

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19118 N

Thema

Neue Methoden zur Erfassung der Altpapierqualität hinsichtlich der Kriterien der Neufassung der DIN EN 643 zur Charakterisierung der Altpapiersorten

Berichtszeitraum

01.07.2016 – 30.06.2019

Forschungsvereinigung

Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.

Forschungseinrichtung

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik



Darmstadt, 30.09.2019

T. Krebs

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Alexanderstr. 8
64283 Darmstadt
Telefon: 06151 / 16 22580
Telefax: 06151 / 16 22581

Zusammenfassung

In der deutschen Papierindustrie werden jedes Jahr etwa 17 Millionen Tonnen Altpapier als Rohstoff zur Produktion von 22,6 Millionen Tonnen Papier und Pappe eingesetzt. Dies entspricht einer Altpapier-Einsatzquote von 75 % [1]. Altpapier ist damit der wichtigste Rohstoff der deutschen Papierindustrie. Auch im internationalen Vergleich liegt Deutschland mit seinem Altpapiereinsatz auf einem Spitzenplatz. In Europa wird Altpapier gemäß der Standardsortenliste EN 643 in eine große Zahl verschiedener Klassen eingeteilt. Seit der Revision im Jahre 2013 enthält diese Norm einige grundsätzliche Verbesserungen, insbesondere in Hinblick auf die sortenspezifischen Toleranzgrenzen für papierfremde Bestandteile und eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Sorten [2]. Nichtsdestotrotz reichen diese Informationen nicht aus, um die Qualität der einzelnen Altpapiersorten im Sinne ihres Potentials zur Herstellung neuer Papier- und Pappe-Produkte abzuleiten.

Papierprodukte, und damit auch die Qualität von Altpapier, unterliegen einer Vielzahl von Veränderungen und Innovationen. Die Auswirkungen dieser Innovationen machen sich im Recyclingkreislauf bemerkbar. Häufig wird dies erst nach einer Zeit der Anreicherung sichtbar. Beispielsweise führt der Trend zu hohem Druckglanz dazu, dass grafische Papiere mittlerweile oft gestrichen sind, was den Anteil an mineralischen Bestandteilen in Altpapieren der grafischen Sortengruppen deutlich erhöht. Bei Verpackungspapieren wiederum ist ein Trend zu höherwertigen Produkten mit weißen, dem Verbraucher zugewandten Außenlagen zu beobachten. Dies führt tendenziell zu hochwertigen Zellstofffasern in den Sortengruppen des Verpackungsaltpapiers. Solche und andere Entwicklungen bei Papierendprodukten verändern die Altpapierqualität laufend. Um diese dynamischen Prozess zu erfassen ist eine kontinuierliche Messung von Qualitätseigenschaften notwendig. Aus diesem Grund führt das Institut für Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik etwa alle 10 Jahre eine Studie zur aktuellen Altpapierqualität in Deutschland durch [3, 4, 5, 6, 7]. Aufgrund der Limitierungen in Zeit und finanziellen Mitteln sowie des großen Aufwands durch die große Zahl an durchgeführten Untersuchungen und gemessenen Parametern an den einzelnen Proben können nicht alle Sorten der Standardsortenliste untersucht werden. Daher beschränken sich die Untersuchungen auf die drei wichtigsten Sorten 1.02.00 (gemischtes Altpapier), 1.04.00 (Verpackungen aus Papier und Karton) und 1.11.00 (Deinkingware), die zusammen bereits einen großen Teil des in Deutschland gehandelten Altpapiers ausmachen [1]. Diese Sorten geben daher ein gutes Bild der aktuellen Altpapierqualität in Deutschland. Außerdem wurde für die aktuelle Untersuchung noch die Sorte 3.10.00 (Multidruck) erstmalig untersucht. Gemessen werden neben der Zusammensetzung insbesondere auch Suspensionseigenschaften, mechanische Eigenschaften und chemische Inhaltsstoffe der genannten Altpapiersorten. Um ein umfassendes Bild der aktuellen Altpapierqualität in ganz Deutschland zu erhalten und möglichen regionalen Besonderheiten keine zu hohe Gewichtung zu geben, wurden Proben von insgesamt 9 Standorten untersucht, die über ganz Deutschland verteilt liegen. Bei den Standorten handelt es sich sowohl um Papierfabriken als auch um Papiersortieranlagen und Altpapierhändler. Die Probenmenge der Einzelproben wurde so gewählt, dass die Zusammensetzung repräsentativ für eine Altpapierlieferung ist. Wie dies zu erreichen ist, wird in der Literatur beschrieben [8]. Je nach Sorte lag der Umfang einer Probe zwischen 40 kg und 100 kg. Im Wesentlichen bestätigten die gemessenen Werte die Ergebnisse der Untersuchung von 2010. Trotz der geschlosseneren Recyclingkreisläufen kam es zu keinen drastischen Einbrüchen in den gemessenen

Qualitätsparametern. Ein „Recycling-Kollaps“ ist auf Grundlage der vorliegenden Zahlen und Trends nicht zu erwarten.

Ein besonderes Augenmerk lag in diesem Projekt auf der Bestimmung der Zusammensetzung der Altpapierproben. Bisher gibt es bisher kein automatisches Messverfahren, das es ermöglicht, Altpapierproben hinsichtlich ihrer Zusammensetzung nach den Vorgaben der EN643 zu analysieren. Aus diesem Grund wurden Altpapierproben, bei denen eine genaue Bestimmung der Zusammensetzung notwendig war, in der Vergangenheit immer manuell ausgezählt. Dieser Vorgang ist besonders zeitintensiv. Abhängig von der Probenzusammensetzung kann die Auszählung von 10 kg Probenmaterial bis zu 3 Stunden in Anspruch nehmen. Im Rahmen dieses Projekts wurde daher die Entwicklung eines automatischen Messsystems vorangetrieben, das den zeitlichen und personellen Aufwand der Probenanalyse signifikant reduziert. Mit Hilfe von künstlicher Intelligenz können die von Sensoren gemessenen charakteristischen Merkmale von Papierobjekten dazu genutzt werden, diese in verschiedene Papierklassen einzuordnen. Hierfür wurde das bisher halbautomatische Messsystem u. a. um einen Roboter erweitert, um den Prozess der Probenanalyse vollständig zu automatisieren. Des Weiteren wurden neue Sensoren in das Messsystem integriert und die Auswertelgorithmen verbessert. Dadurch konnte die Erkennungsrate der zu unterscheidenden Papierklassen deutlich verbessert werden.

Inhalt

Zusammenfassung.....	2
1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	7
1.1. Ausgangssituation.....	7
1.2. Stand der Forschung.....	8
2. Forschungsziel / Lösungsweg	10
2.1. Forschungsziel.....	10
2.2. Lösungsweg.....	11
2.2.1. AP1: Weiterentwicklung der Anlage zur Erfassung von Altpapierzusammensetzungen	12
2.2.2. AP2: Methodenentwicklung.....	12
2.2.3. AP3: Evaluation der Praxistauglichkeit der Methode	13
2.2.4. AP4: Umfassende Erhebung der Altpapierqualität.....	13
2.2.5. AP5: Auswertung und Zukunftsszenarien.....	14
2.2.6. Dokumentation.....	14
2.3. Personaleinsatz.....	14
3. Versuchsdurchführung	16
3.1. Untersuchte Altpapiersorten	16
3.2. Probenahme	17
3.3. Durchgeführte Untersuchungen	18
3.3.1. Feuchtigkeitsgehalt	19
3.3.2. Zusammensetzung des Altpapiers	19
3.3.3. Suspensionseigenschaften	20
3.3.4. Optische Eigenschaften	21
3.3.5. Festigkeitseigenschaften.....	21
3.3.6. Chemische Inhaltsstoffe.....	22
3.4. Durchführung der Laboranalysen	23
4. Ergebnisse und Diskussion der Altpapier-Studie.....	27
4.1. Feuchtigkeitsgehalt	27
4.2. Zusammensetzung.....	28
4.2.1. Zusammensetzung der Sorte 1.02 im Detail.....	31
4.2.2. Zusammensetzung der Sorte 1.04 im Detail.....	32

4.2.3.	Zusammensetzung der Sorte 1.11 im Detail.....	34
4.3.	Suspensionseigenschaften.....	35
4.3.1.	Aschegehalt	35
4.3.2.	Entwässerungsverhalten	37
4.3.3.	Wasserrückhaltevermögen.....	39
4.3.4.	Faserfraktionierung	40
4.3.5.	Makro-Stickygehalt.....	44
4.3.6.	Mikro-Stickygehalt.....	45
4.3.7.	Schmutzpunkte	46
4.4.	Optische Eigenschaften	48
4.4.1.	Weißgrad (R_{457}).....	48
4.4.2.	Hellbezugswert (Y).....	49
4.4.3.	L [*] -, a [*] -, b [*] -Werte.....	50
4.4.4.	ERIC	53
4.5.	Festigkeitseigenschaften.....	54
4.5.1.	Zugfestigkeit (Reißlänge), Weiterreißarbeit und Berstfestigkeit	54
4.5.2.	Ring-, Streifen- und Flachstauchwiderstand.....	57
4.6.	Chemische Inhaltsstoffe	59
4.6.1.	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	59
4.6.2.	Organische Halogenverbindungen (OX).....	60
4.6.3.	Pentachlorphenol (PCP).....	61
4.6.4.	Schwermetalle.....	62
4.6.5.	Phthalate.....	65
5.	Ergebnisse und Diskussion der Messsystementwicklung	68
5.1.	Stand zu Projektbeginn	68
5.2.	Anlagenkonzept	69
5.3.	Automatisierung im Detail	70
5.3.1.	Vorvereinzelung der Altpapierprobe	70
5.3.2.	Vereinzelung von Altpapierobjekten	71
5.3.3.	Analyseprozess.....	78
5.3.4.	Validierung	78
5.4.	Objektklassifikation	80
5.4.1.	Optimierung der bisherigen Merkmalsextraktion.....	80

5.4.2. Neue Sensoren	81
5.4.3. Klassifikation	84
6. Wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)	87
6.1. Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit	87
6.2. Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse	87
6.3. Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse	88
7. Ergebnistransfer	89
8. Danksagung	92
9. Literaturverzeichnis	93
10. Anhang	95
10.1. Bildanalysealgorithmen	95
10.2. Altpapiersortierkatalog	97

1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

1.1. Ausgangssituation

Altpapier ist die wichtigste Rohstoffquelle der deutschen Papierindustrie [9]. Beim Altpapierrecycling werden bereits mechanisch oder chemisch erschlossene Pflanzenfasern erneut genutzt. In der Papierverarbeitung werden Materialien wie Klebstoffe, Druckfarben, Beschichtungen, Kunststoffsichtfenster etc. eingesetzt, die eine komplexe Aufbereitung des Altpapiers vor dem Wiedereinsatz der Fasern als Rohstoff für neues Papier nötig machen. Störend auf das Recycling wirken sich bei der Papierproduktion eingesetzte Ergänzungsstoffe wie mineralische Füllstoffe, Nassfestmittel, Streichfarben und deren Binder etc. aus. Zudem kommt es zusätzlich zu Verunreinigungen durch Fehlwürfe und nicht erfolgte Abtrennungen bei der Altpapiersortierung.

Generell sind diese Herausforderungen nicht neu und die gängige Verfahrenstechnik ist auf die Abscheidung der störenden Bestandteile im Altpapier ausgerichtet. Jedoch muss bei der Projektierung der Anlagen ein Korridor an erwartetem Verschmutzungsgrad des einzusetzenden Altpapiers zugrunde gelegt werden, um sowohl eine Über- als auch eine Unterdimensionierung der Anlage zu vermeiden. Dabei hilft die Einteilung verschiedener Altpapiere in unterschiedliche Sorten, wie sie von der DIN EN 643 [2] in Europa oder dem Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI; [10]) in den USA definiert werden.

Papierprodukte unterliegen Veränderungen und Innovationen wie andere Produkte auch. Die Auswirkungen dieser Innovationen machen sich im Recyclingkreislauf bemerkbar, oft erst nach einiger Zeit durch Anreicherung. Beispielsweise führt der Trend zu hohem Druckglanz dazu, dass graphische Papiere mittlerweile oft gestrichen sind, was den Anteil an mineralischen Bestandteilen in Altpapieren der graphischen Sortengruppen deutlich erhöht. Bei Verpackungspapieren wiederum ist ein Trend zu höherwertigen Produkten mit weißen, dem Verbraucher zugewandten Außenlagen zu beobachten. Dies führt tendenziell zu hochwertigen Zellstofffasern in den Sortengruppen des Verpackungsaltpapiers.

Solche und andere Entwicklungen bei Papierendprodukten verändern die Altpapierqualität laufend. Dies bleibt nicht ohne Konsequenzen für die altpapiereinsetzenden Papierhersteller, die ihre Aufbereitungsanlagen dem sukzessive anpassen müssen [4]. Des Weiteren treten die Papierhersteller an ihre Altpapierlieferanten heran und fordern von diesen geänderte Sortiertechniken, um die Rohstoffqualität innerhalb des für die Aufbereitungsanlagen erforderlichen Korridors zu halten [3].

Auf europäischer Normungsebene ist auf diese Situation reagiert worden. Mit der EN 643 *“European List of Standard Grades of Recovered Paper and Board“* wurde im Jahr 2013 eine Revision der bisherigen Altpapiersortenliste vorgenommen und in 2014 auch als DIN übernommen [2]. Das Deutsche Institut für Normung (DIN e.V.) installierte im März 2015 zudem einen Arbeitsausschuss NA 074-01-13 AA „Europäische Sortenliste“, der zwei Ziele verfolgen soll [11]:

1. Entwicklung von grundlegenden Probenahmestrategien und Prüfmethoden zur Anwendung in Labor und Praxis,
2. Identifizierung und Elimination von Fehlern in der jetzigen Fassung der DIN EN 643 sowie Identifizierung von zukünftigen potenziellen Anforderungen an die Norm.

Beide Ziele bedürfen der Unterstützung durch wissenschaftliche Forschung. Es gilt festzustellen, welche Veränderungen sich im Altpapier seit vorangegangenen Untersuchungen [12] ergeben

haben. Die in diesen Untersuchungen interessierenden Parameter reichten von papierfremden und unerwünschten Papierbestandteilen über optische und Festigkeitseigenschaften hin zur Zusammensetzung (z. B. Glührückstand, Anteil diverser Faserfraktionen) und Inhaltsstoffen (CSB, OX-Gehalt, Schwermetallgehalt). Veränderungen zu heute sind insbesondere im Bereich des Gehalts an mineralischen Bestandteilen und im Gehalt an nicht faserigen Materialien zu erwarten, dies ist den Produktinnovationen geschuldet. Aber es steht auch zu erwarten, dass sich Fasereigenschaften (Anteil der Faserfraktionen, Schopper-Riegler-Wert etc.) verschoben haben, da der Recyclingkreislauf seit diesen Untersuchungen im Jahr 2000 in Europa enger geworden ist und somit mehr rezykliertes Material als Rohstoff eingesetzt wird als bspw. noch 2000. So betrug die Recyclingquote in Europa im Jahr 2000 noch 51,8 % und stieg bis 2013 auf 71,7 % [13].

Auch indirekt wirken sich die Änderungen der Altpapierqualität aus. Dies zeigt sich in der Menge an Rejekten und Schlämmen. Zwischen 1994 und 2007 beispielsweise stiegen die Rückstandsmengen der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie von knapp unter 3 Mio t auf über 4 Mio t an [14]. Jüngere Untersuchungen zeigen, dass vor allem der Anteil an Faserabfällen aus der mechanischen Abtrennung (Abfallschlüsselnummer AVV 03 03 10) deutlich zugenommen hat [15]. Dies kann durch die Zunahme an Deinkingschlämmen wegen höherer Mineralstoffanteile im Altpapier und anderen Rückständen der Altpapierverwertung wegen stärkerer Verunreinigung bedingt sein.

Letztlich machen sich Veränderungen in der Altpapierqualität mehrfach wirtschaftlich bemerkbar:

- in der ökonomischen Betreibbarkeit der Altpapieraufbereitungsanlage,
- in der möglichen Ausbeute an qualitativ geeignetem Faserstoff,
- in den Kosten beim Umgang mit den anfallenden Rejekten und Schlämmen.

Bei einem angenommenen Altpapierpreis von 100,- €/t (was als Mittelwert über verschiedene Sorten gelten kann) und einem Verbrauch von 16,6 Mio t im Jahr 2015 ([16]) entspräche eine Erhöhung der Ausbeute um 1 % einer finanziellen Einsparung von 16,6 Mio € beim Rohstoffeinsatz. Da gleichzeitig diese Menge nicht mehr als Rejekt entsorgt werden müsste (hier kann von etwa 25,- € Entsorgungskosten je Tonne Rejekt als Schlamm ausgegangen werden bzw. 100,- €/t als Grobrejekt), käme ein weiterer Nutzen von mindestens 4,15 Mio € hinzu. Der volkswirtschaftliche Gesamtnutzen läge so bei über 20 Mio €, wobei z. B. Energieeinsparungen durch bessere Runability der Anlagen noch nicht abgeschätzt und eingerechnet sind.

1.2. Stand der Forschung

Öffentlich verfügbare und relativ aktuelle Ergebnisse zur Altpapierqualität liegen international betrachtet nur von zwei Forschungsstellen vor: der durchführenden Forschungsstelle und der Papiertechnischen Stiftung. Aus anderen Ländern sind keine Veröffentlichungen zu finden. Die Arbeiten der Papiertechnischen Stiftung (bspw. [17], [18], [19]) beziehen sich jeweils nur auf Teilaspekte der Altpapierqualität, z. B. die Zusammensetzung [17] oder die Eigenschaften der Altpapiersuspension [19] und erheben nicht den Anspruch, die Altpapierqualität repräsentativ abzubilden.

Von der durchführenden Forschungsstelle liegen zahlreiche Arbeiten zur Altpapierqualität vor ([4], [3], [12], [6], [7]). Die letzte umfassende Untersuchung mit Berichtsdatum aus dem Jahr 2010 bezieht sich auf ganz Deutschland und berücksichtigt neben der Zusammensetzung von verschiedenen Altpapiersorten auch deren papiertechnologische Eigenschaften [4]. Aus diesen Untersuchungen ist auch bekannt, dass die Altpapierqualität im Laufe der Zeit relevanten

Veränderungen unterliegt, sodass die Ergebnisse aus [4] mittlerweile nicht mehr aktuell sind. Dies ist hier insbesondere dadurch der Fall, dass im Jahr 2014 die Liste der Altpapier-Standardsorten [2] einer Revision unterlag, bei der Grenzwerte für die papierfremden und die unerwünschten Bestandteile eingeführt wurden. Zu beachten ist, dass „papierfremde Bestandteile“ in der Norm neu definiert wurden und somit die Kompatibilität zu alten Untersuchungsergebnissen kritisch zu hinterfragen ist.

In dem IGF-Vorhaben 17496 N "Modellierung und systematische Bewertung von Altpapiersortieranlagen" (Laufzeit bis 31.07.2015) werden unter anderem aktuelle Daten zur Zusammensetzung von Altpapier gewonnen. Allerdings werden in dem Projekt keine papiertechnologischen Eigenschaften des Altpapiers betrachtet. Außerdem beziehen sich die Daten nur auf wenige Orte in Deutschland und sind somit nicht repräsentativ.

2. Forschungsziel / Lösungsweg

2.1. Forschungsziel

Als angestrebte Forschungsergebnisse werden erstmalig erwartet:

- Stand der Altpapierqualität in den Sortengruppen nach Revision der Sortenliste durch die DIN EN 643,
- Entwicklung labor- und praxistauglicher Methoden zur Beschreibung der Altpapierqualität,
- Beurteilung von Sortieranlagen bei den Altpapierhändlern hinsichtlich der Sortierqualität,
- objektive Darstellung der Entwicklung der Altpapierqualität anhand des Vergleichs der neuen Ergebnisse mit älteren Studien aus den Jahren 2000 und 2010 ([12], [4]),
- Analyse der Auswirkungen von Papierproduktinnovationen auf die Entwicklung der Altpapierqualität,
- Betrachtung möglicher Zukunftsszenarien für die Altpapierqualität unter Nutzung der beim Vergleich mit älteren Studien gewonnen Erkenntnisse.

Hieraus können Empfehlungen für den Arbeitsausschuss NA 074-01-13 AA „Europäische Sortenliste“ abgeleitet werden, sowohl was Korrekturen der Norm DIN EN 643 angeht als auch was zukünftige potenzielle Anforderungen an die Norm betrifft.

Des Weiteren lassen sich Empfehlungen an die Altpapierhändler für den Betrieb ihrer Sortieranlagen ableiten, wobei das Ziel des gewünschten Sortierergebnisses sich aus den Anforderungen der altpapierverarbeitenden Papierfabriken ergibt.

Die Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Produktinnovationen auf den Recyclingkreislauf können bei Innovationsprozessen eingebunden werden und sind unter Umständen auch von Marketingabteilungen der Hersteller von Papierendprodukten nutzbar.

Letztlich wird sich auch ein ökologischer Nutzen ergeben, da das Papierrecycling auf hohem Niveau noch weiter optimiert werden kann.

Die angestrebten Ergebnisse werden in den KMU der Wirtschaftszweige Herstellung von graphischen und Verpackungspapieren auf Altpapierbasis, Herstellung von Faltschachteln und Wellpappeschachteln, Altpapierhändlern, Herstellern von Sortieranlagen und Altpapieraufbereitungsanlagen, bei Messtechnikherstellern, Consultingfirmen und im Normungswesen auf hohes Interesse stoßen. Das Forschungsthema umfasst Schnittmengen zu den Fachgebieten Ressourceneffizienz (FD), Verfahrenstechnik (MC), Umwelttechnik (FB) sowie Mess- und Regelungstechnik (GD).

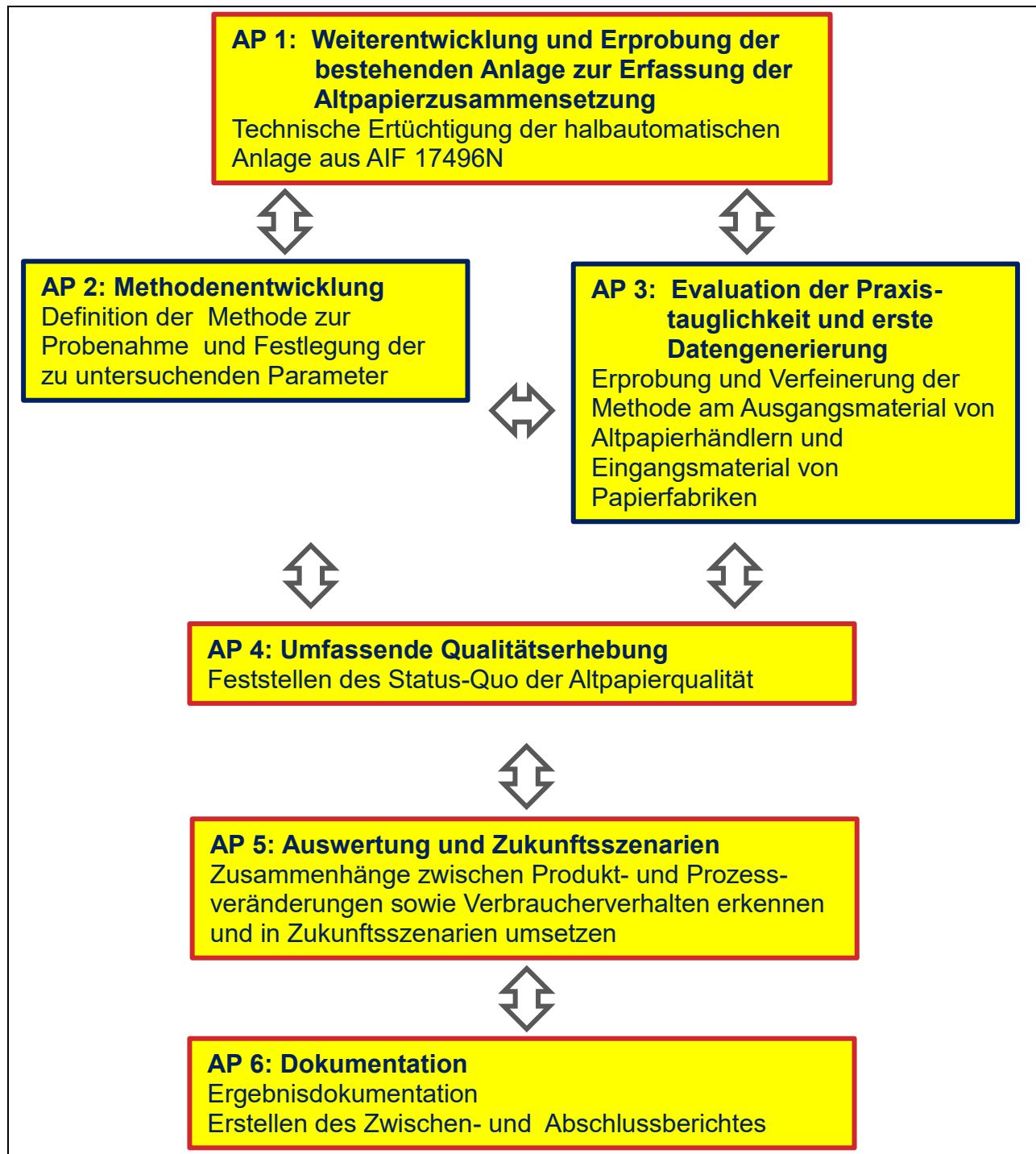


Abb. 1: Ablaufplan des Forschungsvorhabens

2.2. Lösungsweg

Das Vorhaben ist in sechs Arbeitspakete gegliedert (siehe Abb. 1). Bestehende Messmethoden zur Bestimmung der Altpapierqualität werden weiterentwickelt und industrietauglich gemacht (Arbeitspakete 1 bis 3).

Anschließend erfolgt eine umfassende Qualitätserhebung von Altpapier. Die dabei erhaltenen

Daten werden mit Vorgängerstudien verglichen. Aus den erwarteten Veränderungen diverser Parameter in Verbindung mit bekannten Entwicklungen in der Wirtschaft und im Verbraucherverhalten – sofern bei diesen ein Einfluss auf die Altpapierqualität unterstellt werden kann – können Überlegungen für die Zukunft angestellt und Szenarien entwickelt werden. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst (Arbeitspakete 4 bis 6).

2.2.1. AP1: Weiterentwicklung der Anlage zur Erfassung von Altpapierzusammensetzungen

Die Analyse der Zusammensetzung von Altpapierproben erfolgte in bisher durchgeführten Projekten der Forschungsstelle (z. B. [4]) vollständig manuell. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig. Die Auswertung einer Altpapierprobe in einer üblichen Größe von 100 kg kann dabei bis zu 10 Stunden dauern. In dem IGF-Vorhaben 17496 N "Modellierung und systematische Bewertung von Altpapiersortieranlagen" wurde von der Forschungsstelle eine halbautomatische Anlage zur Analyse der Zusammensetzung von Altpapierproben entwickelt. Mit dieser Anlage kann die Analysezeit auf ca. die Hälfte reduziert werden. Per Hand werden die einzelnen Objekte einer Altpapierprobe auf ein Förderband gelegt. Die Objekte laufen in die Messeinheit, in der sie durch Bildanalyse einer von 6 verschiedenen Altpapierobjektklassen zugeordnet werden. Objekte, die diesen 6 Altpapierklassen nicht zugeordnet werden können (beispielsweise papierfremde Objekte und Papier, das für das Recycling ungeeignet ist), werden manuell analysiert. Ziel des Arbeitspaktes 1 ist es, die bisher halbautomatische Anlage zu einer möglichst vollautomatischen Anlage zu erweitern, da durch eine vollautomatisierte Probenanalyse viel Arbeitszeit eingespart werden kann.

2.2.2. AP2: Methodenentwicklung

Ziel des Arbeitspakets ist es, eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Altpapierqualität weiter zu entwickeln. In vorangegangenen Projekten der Forschungsstelle wurde folgendes Procedere eingesetzt:

- Probenahme von Altpapier,
- Untersuchung der Feuchte und der Zusammensetzung,
- Zerkleinerung der Proben,
- Untersuchung ausgesuchter Suspensionseigenschaften und chemischer Inhaltsstoffe,
- Laborblattbildung,
- Untersuchung optischer Eigenschaften und Festigkeitseigenschaften der Blätter.

Diese Vorgehensweise ist zu überarbeiten, insbesondere die Punkte 1 und 2. Denn sie eignet sich nach der Revision der Altpapiersortenliste [1] nicht mehr, um die Qualität von in dieser Norm definierten Altpapiersorten zu beurteilen. Um Kompatibilität zu erreichen, ist das Verfahren der Probenahme neu zu definieren, wobei auch Mindestprobenmengen festgelegt werden sollten. Außerdem wird ein neues Verfahren zur Analyse der Zusammensetzung benötigt, denn die Definition von beispielsweise papierfremden Bestandteilen wurde in der neuen Norm verändert.

2.2.3. AP3: Evaluation der Praxistauglichkeit der Methode

In diesem Arbeitspaket sollen die im Arbeitspaket 1 entwickelte Anlage und die im Arbeitspaket 2 entwickelten Vorgehensweisen an gängigen Altpapiersorten aus der industriellen Praxis erprobt werden. Die Probenahme erfolgt für die Altpapiersorten sowohl am Ausgangsmaterial von Altpapierhändlern als auch am Eingangsmaterial von Papierfabriken. Außerdem wird das zugehörige Eingangsmaterial zu den Altpapiersortierbetrieben beprobt, um Rückschlüsse auf die Sortiereffektivität zu ermöglichen. Die in diesem Arbeitspaket erhobenen Daten werden bereits in den Status-Quo-Bericht zur Altpapierqualität (Arbeitspaket 4) einfließen.

2.2.4. AP4: Umfassende Erhebung der Altpapierqualität

In diesem Arbeitspaket sollen Daten zum Status-Quo der Altpapierqualität Deutschlands an ausgewählten Sorten erfasst und mit Vorgängerstudien verglichen werden. Dazu werden die bisher erhobenen Parameter um einige neue ergänzt. Es sollen folgende Parameter gemessen werden:

- 1) Grundeigenschaften:
Feuchtegehalt, Aschegehalt, Zusammensetzung, Verhältnis zwischen Zellstoff- und Holzstoffanteil
- 2) Stoff- und papiertechnologische Eigenschaften:
Entwässerungsverhalten, Faserfraktionen, Makro-Stickys, Mikro-Sticky-Messung mit Hilfe eines Flow-Cytometers, Schmutzpunkte, Festigkeitseigenschaften, optische Eigenschaften
- 3) Chemische Inhaltsstoffe:
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Chlorierte Kohlenwasserstoffe (OX), Pentachlorphenol (PCP), kationischer Bedarf

Die meisten dieser Parameter können mit den Werten aus den Studien IGF 15408 aus dem Jahr 2010 [4] und INGEDE 12608 aus dem Jahr 2011 [3] sowie der AGRAPA-Studie von 2000 [7] verglichen werden.

Wieder aufgenommen wurde das Verhältnis von Zellstoff zu Holzschliff, welches durch eine lichtmikroskopische Faseranalyse nach TAPPI 401 bestimmt werden kann [20]. Neben der Faserlängenverteilung ist dieser Wert ein Maß für das Gesamtpotenzial des vorliegenden Fasergemisches im Altpapier. Auch die Messung der Schmutzpunkte ist neu und soll dem Aspekt Rechnung tragen, dass mehr und mehr digitale Printmedien ins Altpapier gelangen.

Neu sind zudem die Messungen des Mikro-Sticky-Gehalts mit Hilfe der Flow-Cytometrie (wie sie etwa von Nellessen vorgestellt wurde [21]) und die Messung des kationischen Bedarfs einer definiert aufgeschlagenen Altpapierprobe. Diese Parameter sollen Auskunft über den Gehalt an nicht sichtbaren Verunreinigungen bzw. unerwünschten Inhaltsstoffen geben. Hintergrund ist, dass beispielsweise durch das verstärkte Streichen von Papier auch mehr Bindemittel ins Altpapier gelangt, was die Gefahr von White-Pitch-Ablagerungen erhöht. Die Methode der Flow-Cytometrie ist bisher noch keine etablierte Standardmethode für die Stickybestimmung. Im Rahmen dieses Projekts könnte jedoch mit wenig Zusatzaufwand (über „Leistungen Dritter“) erprobt werden, ob sich diese – gegenüber herkömmlichen Methoden sehr schnelle und damit kostengünstigere – Analytik für diesen Einsatz eignet bzw. wo ggf. Defizite bestehen.

Wieder ins Messprogramm aufgenommen wurden die Schwermetalle. Diese waren in der

AGRAPA-Studie [7] noch untersucht worden, in den folgenden Studien nicht mehr. Verzichtet werden soll jedoch auf die Messung des DIPN-Gehaltes, da diese Chemikalie keine Indikatorfunktion hinsichtlich der Altpapierqualität mehr hat.

Die Probenahme findet sowohl bei Altpapierhändlern statt als auch an Ware, die den Papierherstellern angeliefert wird. Mehrere Probenahmeorte und auch Zeitpunkte werden so gewählt, dass Daten für den gesamten deutschen Markt generiert werden.

2.2.5. AP5: Auswertung und Zukunftsszenarien

Die in den Arbeitspaketen 3 und 4 aufgenommenen Daten werden ausgewertet. Sie lassen bereits Rückschlüsse auf den Recyclingkreislauf, das Verbraucherverhalten und gängige Praktiken im Wirtschaftskreislauf zu. Durch den Vergleich mit den vorangegangenen Untersuchungen können die Hypothesen plausibilisiert oder auch verifiziert werden.

Tendenzen in der Verpackungsindustrie (z. B. wachsender Einsatz von weißgedecktem oder gestrichenem Liner bei der Wellpappe, Anwendung von Barrierebeschichtungen und Verbesserungen im farbigen Flexodruck) sollten sich in der Charakteristik des Altpapiers ebenso niederschlagen wie der Rückgang von Tageszeitungen, der Anstieg digitaler Printmedien oder die zunehmende Oberflächenverbesserung von Druckpapieren durch Streichen.

2.2.6. Dokumentation

Die in den Arbeitspaketen 1 bis 5 erarbeiteten technischen Lösungen, die erhobenen Daten und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen werden in Zwischen- und Abschlussberichten nachvollziehbar und durch Dritte wiederholbar dokumentiert.

2.3. Personaleinsatz

Für die Recherche, die Entwicklung der Versuchspläne sowie die Auswertung der Versuche, Evaluation der Versuchsergebnisse und die Kostenbetrachtungen war der wissenschaftliche Mitarbeiter des PMV (TU Darmstadt) zuständig. Ihm unterlag auch die wissenschaftliche Leitung. Die routinemäßige Durchführung von Laborversuchen oblag dem Laborpersonal der Forschungsstelle. Für diverse Hilfstätigkeiten im Labor und bei der Auswertung war eine studentische Hilfskraft vorgesehen.

Die geleistete Arbeit des wissenschaftlich-technischen Personals (A.1, HPA A) von insgesamt 17 Personenmonaten über die gesamte Laufzeit des Vorhabens, inklusive der sechsmonatigen Verlängerung, waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Gleiches gilt für die geleistete Arbeit des übrigen Fachpersonals und der Hilfskräfte. Ursprünglich waren nur 16 Personenmonate für wissenschaftlich-technisches Personal beantragt. Im Laufe der Bearbeitung des Projekts wurde festgestellt, dass die umfassende Bearbeitung der Arbeitspakete einen geringfügig höheren Aufwand an wissenschaftlich-technischem Personal erforderte. Aus diesem Grund wurde die Zahl der Personenmonate um 1 erhöht. Gleichzeitig konnten die notwendigen Personenmonate im Laborbereich sowie Leistungen Dritter eingespart werden (siehe unten). Leider wurde die Mitteilung an die AiF zur Änderung der Personenmonate versäumt. Dies wird zukünftig vermieden, in dem ein zusätzlicher Controlling-Mechanismus

eingeführt wird, um die bewilligten Personenmonate während der Projektlaufzeit permanent überwachen zu können. Die Ausgabenneutralität war zu jeder Zeit gegeben.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Roboter inkl. Steuerungssoftware für insgesamt 34.508,36 € angeschafft. Im Projektantrag waren Kosten von 32.570,30 € vorgesehen. Die Mehrkosten belaufen sich daher auf 1.938,06 €, die aus den Pauschalen des Projekts finanziert wurden.

Die im Projektantrag durch Leistungen Dritter vorgesehenen Mikro-Stickymessungen mit einem Durchflusszytometer wurden wie geplant durchgeführt. Diese konnten abweichend zum Projektplan kostenfrei bei einem Projektbegleiter vorgenommen werden. Die Zeit für die Durchführung dieser Messungen wurde als vorhabensbezogene Ausgaben der Wirtschaft (vAW) ausgewiesen.

3. Versuchsdurchführung

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet die Beschreibung der untersuchten Altpapiersorten, das Vorgehens bei der Probenahme und die geprüften Qualitätsmerkmale.

Bei der Durchführung der Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass die gewonnenen Ergebnisse möglichst mit den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen vergleichbar sind. Aus diesem Grund wurde die Versuchsdurchführung im Wesentlichen analog zu den Projekten AiF 11420 [12] und AiF 15408 [4] durchgeführt und die erlangten Ergebnisse in ähnlicher Weise dargestellt.

3.1. Untersuchte Altpapiersorten

Die Altpapiersortenliste DIN EN 643 beinhaltet eine Vielzahl verschiedener Sorten. Diese alle in einem Projekt zu untersuchen wäre bei Weitem zu aufwändig. Aus diesem Grund wurde für dieses Projekt eine Auswahl von vier Sorten getroffen. Nachfolgenden ist eine Auflistung untersuchten Sorten aufgeführt mit einer Beschreibung aus der Altpapiersortenliste:

- 1.02.00 Gemischtes Altpapier:

Mischung verschiedener Papier- Karton- und Pappequalitäten, die maximal 40 % an Zeitungen und Illustrierten enthalten; papierfremde Bestandteile maximal 1,5 %; unerwünschte Materialien maximal 2,5 %.

- 1.04.00 Verpackungen aus Papier und Karton:

Gebrauchte Papier und Kartonverpackungen, die mindestens 70 % Wellpappe enthalten, der Rest sind Verpackungen aus Papier, Karton und Pappe; papierfremde Bestandteile maximal 1,5 %; unerwünschte Materialien maximal 3 %.

- 1.11.00 Deinkingware

Sortiertes graphisches Papier, mindestens 80 % Zeitungen und Illustrierte. Es müssen mindestens 30 % Zeitungen und 40 % Illustrierte enthalten sein. Druckprodukte, die für Deinking ungeeignet sind, sind auf 1,5 % begrenzt; papierfremde Bestandteile maximal 0,5 %; unerwünschte Materialien maximal 2,5 %.

- 3.10.00 Multidruck

Holzfreies, gestrichenes Papier mit leichtem Andruck, als Bogen oder Randabschnitte, frei von nassfestem oder durchgefärbtem Papier; papierfremde Bestandteile maximal 0,5 %; unerwünschte Materialien maximal 1 %.

Die Sorten 1.02.00, 1.04.00 und 1.11.00 gehörten zu der Gruppe der unteren Sorten (Bezeichnung 1.xx.xx) , die Sorte 3.10 zu der Gruppe der mittleren Sorten (Bezeichnung 3.xx.xx). Der Einfachheit halber werden im Folgenden die letzten beiden Ziffern weggelassen. Gemeint ist aber immer die Sorte mit der Endung 00.

Die Sorten 1.11 und 3.10 werden hauptsächlich für die Herstellung grafischer Papiere verwendet, weshalb sie häufig auch als „grafische Altpapiersorten“ bezeichnet, wohingegen die Sorten 1.02

und 1.04 hauptsächlich für Verpackungspapiere eingesetzt werden und den Beinamen „braune Altpapiersorten“ tragen.

3.2. Probenahme

Die Proben fand sowohl bei Altpapierhändlern, Sortierbetrieben statt als auch an Ware, die den Papierherstellern angeliefert wurde. Die Probenahmen wurden so gewählt, dass durch die Proben Daten für den gesamten deutschen Markt generiert werden. Abb. 2 zeigt eine schematische Karte Deutschlands mit den roten Punkten für die Orte, an denen Proben für das Projekt genommen wurden.

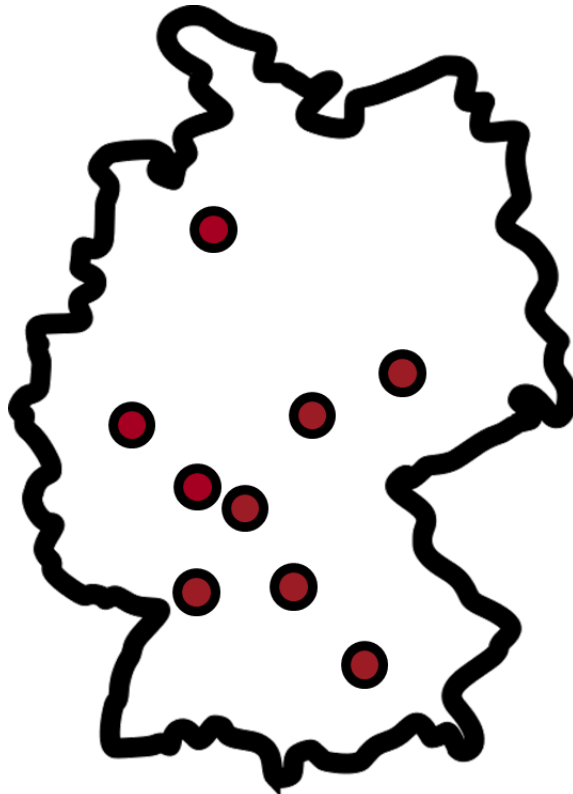


Abb. 2: Übersicht über die Probenahmestellen in ganz Deutschland

Es wurden von jeder der untersuchten Sorten zehn Proben genommen und analysiert. Wurde an einem Standort die gleiche Altpapiersorte mehrfach beprobt, wurde darauf geachtete Altpapier aus verschiedenen Bezugsquellen auszuwählen.

Das Probenahmeverfahren ist an das beschriebene Verfahren im Normentwurf prEN 17085:2018 „Papier und Pappe – Probenahmeverfahren für Altpapier“ angelehnt. Es bestehen aber zum Teil Abweichungen von den empfohlenen Probemengen.

In [8] wurden sortenspezifische Probemengen für die repräsentative Analyse von Altpapierproben definiert. Für Sortierproben ergeben sich demnach folgende Probenumfänge:

- Sorte 1.02: 25 kg
- Sorte 1.04: 100 kg
- Sorte 1.11: 15 kg

Die 100 kg der Sorte 1.04 trägt in erster Linie der Tatsache Rechnung, dass in dieser Sorte besonders viele große und schwere Papierobjekte, in erster Linie Wellpappen, zu finden sind. Bei kleineren Probenumfängen beeinflussen einzelne, schwere Objekte das Ergebnis der Auszählung enorm. Aus diesem Grund muss hier die Probenmenge höher gewählt werden als bei den anderen Sorten. Für die Verarbeitung der Altpapierproben im Technikum nach der Sortieranalyse sind je Probe mindestens 40 kg notwendig. Aus diesem Grund wurde die untersuchten Probenmengen der Sorten 1.02 und 1.11 auf 40 kg erhöht.

Für die Sorte 3.10 konnten keine Vorgaben für eine repräsentative Probennahme gefunden werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine geeignete Probenmenge aufgrund der zu erwartenden homogenen Zusammensetzung nicht oberhalb des Richtwerts der Deinkingware liegen sollte. Aus den gleichen Gründen wie oben beschrieben wurde somit die zu untersuchenden Probenmenge auf 40 kg je Probe festgelegt.

Somit ergeben sich für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts für die einzelnen zu untersuchenden Altpapiersorten je genommener Probe folgende Mengen:

- Sorte 1.02: 40 kg
- Sorte 1.04: 100 kg
- Sorte 1.11: 40 kg
- Sorte 3.10: 40 kg

Insgesamt wurden für jede der zu untersuchenden Sorten 10 Proben untersucht. Die Fehlerbalken der Messergebnisse ergeben sich als die Standardabweichung der 10 untersuchten Proben je Sorte.

3.3. Durchgeführte Untersuchungen

Nach der Probenahme wurden die genommenen Altpapierproben manuell sortiert. Die Sortierung erfolgte gemäß dem am PMV erstellen Altpapiersortierkatalog (siehe Anhang). Bestand die Probe aus mehr als 40 kg, wurden vor der Sortierung zunächst 40 kg abgetrennt und getrennt vom Rest der Probe sortiert. Diese 40 kg wurden anschließend in einem Pulper im Technikum des Instituts nach Zugabe von 1000 Liter Frischwasser homogenisiert. Die Zerfaserungsdauer betrug 10 min bei 70% der maximalen Motorleistung. Dem Pulper wurde 30 Liter der Suspension entnommen, die für die jeweilige Probe repräsentativ sind und für die nachfolgenden Untersuchungen ausreichen. Nach einer weiteren Zerfaserung in einem Eschwer Wyss Pulper erfolgten Untersuchungen der Suspensionseigenschaften und zu chemischen Inhaltsstoffen, sowie, nach der Bildung von Laborblättern, Prüfungen zu mechanischen und optischen Eigenschaften. Die chemischen Inhaltsstoffe wurden an den Filtraten (im Weißband) der Stoffsuspensionen bestimmt. Nachfolgenden werden die verwendeten Prüfmethode kurz aufgeführt und beschrieben:

3.3.1. Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtegehalt der Proben wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 287:2018-03 gravimetrisch bestimmt. Hierfür wurden jeweils ein kleiner Teil jeder Probe am Ort der Probenahme luftdicht verpackt und anschließend im Labor genau 1 kg abgewogen. Der Feuchtgehalt ergibt sich aus der relativen Massenänderung nach der Trocknung.

3.3.2. Zusammensetzung des Altpapiers

Die Zusammensetzung des Altpapiers ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal. Abhängig von der Zusammensetzung wird Altpapier in verschiedenen Klassen gehandelt, die in der Altpapiersortenliste, genauer spezifiziert sind. Entsprechend der typischen Zusammensetzung einer bestimmten Altpapiersorte, wird diese vorzugsweise zur Produktion einer bestimmten Produktgruppe, z.B. für die Herstellung von grafischen Papieren, Verpackungs- oder Hygienepapieren, eingesetzt. Die Analyse der Zusammensetzung der Altpapierproben erfolgt durch manuelle Sortierung. Dabei wurde grundsätzlich nach vier Hauptkategorien unterschieden:

- Grafische Papiere

In dieser Gruppe befinden sich alle Papiere, die für grafische Anwendungen geeignet sind. Hierunter fallen in erster Linie Printmedien, wie z.B. Zeitungen, Werbedrucke, Illustrierte und Magazine, usw.

- Verpackungspapiere und Karton

In dieser Gruppe findet man alle Verpackungen aus Papier und Pappe, die zur Produktion von neuen Verpackungspapieren geeignet sind. Die wesentlichen Vertreter dieser Gruppe sind Wellpappen und Faltschachtelkartons.

- Ungeeignete/sonstige Papiere und Pappen

Diese Kategorie enthält Papierprodukte wie Hygienepapiere, stark verschmutzte Papierprodukte und sonstige ungeeignete Papierprodukte wie z.B. Hybrid-Materialien.

- Papierfremde Stoffe

Hier werden alle Materialien erfasst, die nicht aus Papier oder Pappe bestehen, wie z.B. Kunststoffe, Metalle, Textilien, Glas, Holz usw., sofern sie nicht Teil eines Papierprodukts sind.

Die oben genannten vier Hauptkategorien grafische Papiere, Verpackungspapiere und Karton, ungeeignete/sonstige Papiere und Pappen und papierfremde Stoffe wurden bei der Sortierung noch differenzierter betrachtet. Unterschieden wurden bei den grafischen Papieren:

- Zeitungen
- Illustrierte und Magazine
- Werbedruck
- Bücher + ähnliche
- Weiße/helle Papiere
- Graue/gelbliche Papiere

Die Verpackungspapiere und Pappen wurden eingeteilt in:

- Wellpappe braun
- Wellpappe weiß
- Karton und Pappe grau
- Karton und Pappe braun und gefärbt
- Karton und Pappe weiß/gelb/hell
- Feste Hülsen
- Faserguss
- Sonstige Verpackungspapiere, Pappen, Karton

Die Unterkategorien der ungeeigneten/sonstigen Papiere und Pappen sind:

- Gefärbte grafische Papiere
- Hygienepapiere
- Stark verschmutzte Papiere, Pappen, Karton
- Sonstige ungeeignete Papiere, Pappen, Karton

Die genaue Einteilung und relevante Merkmale können dem, an den Bericht angehängten, PMV-Altapiersortierkatalog entnommen werden.

Papierfremde Stoffe wurden nicht weiter unterschieden. Zu beachten ist allerdings, dass die Definition der der papierfremden Stoffe seit der Neufassung der Altpapiersortenliste im Jahre 2014 konkretisiert wurde. Als papierfremd sind seither nur noch diejenigen Objekte im Altpapier zu betrachten, die nicht Bestandteil eines Papierproduktes sind und sich somit einfach abtrennen lassen. In vorangegangenen Untersuchungen wurden bei der Analyse von Kernbohrungen beispielsweise Kunststoff-Sichtfenster von Briefumschlägen oder Klebebänder von Verpackungen entfernt und als papierfremde Objekte deklariert. Nach der neuen Definition ist dieses Vorgehen nicht mehr zulässig. Aus diesem Grund ist eine Vergleichbarkeit des Anteils papierfremder Stoffe der aktuellen Analysen mit Werten aus vorangegangenen Studien nicht mehr vollständig möglich.

Nach der Sortierung der einzelnen Probe wurden die Objekte jeder einzelnen Kategorie gewogen. In der Auswertung werden die Gewichte in Gewichtsprozent angegeben, bezogen auf die lufttrockene, sortierte Probemenge. Alle papierfremden Objekte wurden nach der Sortierung verworfen, d.h. sie landeten nicht mit im Pulper zur Zelfaserung der Probe. Das restliche Altpapier wurde wieder zusammengeführt und für die weiteren Untersuchungen verwendet.

3.3.3. Suspensionseigenschaften

- Aschegehalt

Der Aschegehalt wurde nach DIN 54370:2007-06 bei den Temperaturen 575 °C und 900 °C bestimmt. Hierbei kam ein LECO Thermogravimetriemessgerät zum Einsatz.

- Entwässerungsverhalten (Schopper-Riegler-Wert)

Das Entwässerungsverhalten nach Schopper-Riegler wurde nach der Norm DIN EN ISO 5267-1:2000-10 bestimmt.

- Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen wurde nach der Methode ZM IV/33/57 bestimmt.

- Faserfraktionierung

Die Untersuchungen der Faserfraktionen wurden mit Hilfe des Haindl-McNett-Geräts durchgeführt. Hierbei kam die Methode ZM V/1.4/86 zum Einsatz. Verwendet wurden eine Schlitzplatte mit 150 µm Schlitzweite und die Siebe mit den Bezeichnungen R30, R50, R100 und R200. Dieses Gerät wurde bereits bei den vorangegangenen Untersuchungen aus dem Jahre 2010 verwendet. In älteren Untersuchungen wurde zur Fraktionierung von Verpackungspapieren und Pappen das Brecht-Holl-Gerät verwendet.

- Makro-Stickygehalt

Der Makro-Stickygehalt wurde gemäß INGEDE-Methode 4 mit einer Schlitzplatte mit 150 µm Schlitzbreite bestimmt.

3.3.4. Optische Eigenschaften

Optische Eigenschaften spielen in erster Linie für grafische Papiere eine entscheidende Rolle. Für den Gebrauchswert von grafischen Papieren ist außerdem das Deinkingverhalten besonders wichtig. Dieses wird beispielsweise durch die Zusammensetzung des Altpapiers, sowie den verwendeten Druckverfahren und –farben beeinflusst.

- Schmutzpunkte

Die Messung der Schmutzpunkte erfolge nach INGEDE-Methode 2.

- Weiße/Weißgrad, Hellbezugswert, Farbmaßzahlen im CIE – System

Alle Weiteren optischen Eigenschaften wurden nach DIN EN ISO 12625 bestimmt.

3.3.5. Festigkeitseigenschaften

Die mechanischen Festigkeitseigenschaften Reißlänge, Weiterreißarbeit und Berstfestigkeit wurden für alle untersuchten Altpapiersorten an Laborblättern mit einem Flächengewicht von möglichst 80 g/m² gemessen.

- Reißlänge

Für die Durchführung der Zugversuche wurde die Norm DIN EN ISO 1924-2:2009-05 herangezogen und die gemessene Bruchkraft in eine Reißlänge umgerechnet.

- Weiterreißarbeit (WRA)

Die WRA wurde nach der Norm DIN 53115:2008 bestimmt.

- Berstfestigkeit

Die Messung der Berstfestigkeit erfolgte nach DIN EN ISO 2758:2014-12.

Die nachfolgenden Eigenschaften Ring-, Streifen- und Flachstauchwiderstand sind insbesondere für Verpackungspapiere und Wellpappenrohapiere von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden diese Parameter nur bei den Sorten 1.02 und 1.04 zusätzlich zu den oben genannten mechanischen Eigenschaften gemessen. Hierfür wurden Blätter mit einem Flächengewicht von 130 g/m² gebildet.

- Ringstauchwiderstand (RCT)

Bei der Bestimmung des Ringstauchwiderstands wird ein zum Ring geformter Streifen aus Papier zwischen zwei planparallelen Platten durch eine Druckkraft gestaucht. Die Prüfung wurde nach DIN 53134:2005-04 durchgeführt.

- Streifenstauchwiderstand (SCT)

Der Streifenstauchwiderstand stellt eine Alternative zum Ringstauchwiderstand dar. Bei der Prüfung wird die Kraft in einem Prüfgerät gemessen, bei der ein flacher Papierstreifen gestaucht wird. Die Bestimmung des SCT erfolgte gemäß DIN 54518:2004-03.

- Flachstauchwiderstand (CMT)

Bei der Bestimmung des Flachstauchwiderstands wird ein Papierstreifen zu einer Welle geformt, auf einem Klebeband fixiert und zwischen zwei parallelen Platten senkrecht zur Welle mit einer Kraft belastet. Die Kraft, bei der die Wellenflanken zusammenbrechen, ist der Flachstauchwiderstand. Die Bestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 7263-1:2018-01.

3.3.6. Chemische Inhaltsstoffe

- Chemischer Sauerstoffbedarf

Der chemische Sauerstoffbedarf wurde am Weißbandfiltrat der Stoffsuspension mit Hilfe von Merck-Küvettestests bestimmt. Zum Einsatz kamen die Tests mit dem Messbereich von 25 bis 1500 mg/L.

- Organische Halogenverbindungen

Die Organischen Halogenverbindungen wurden nach ISO 11480:2017 bestimmt.

- Pentachlorphenol

Zur Messung der Pentachlorphenol-Gehalte wurde eine PMV-Hausmethode verwendet. Diese ermöglicht eine Bestimmung des Gesamtgehalts mittels Methanolextrakt. Die eigentliche Messung wurde mit Hilfe eines Gaschromatographen mit Elektroneneinfangdetektor durchgeführt.

- Phthalate

Die Messung der Phthalate wurde in Analogie zu DIN EN 14719:2005 durchgeführt.

- Schwermetalle

Die Konzentrationen der Schwermetalle Kupfer, Zink, Chrom, Cadmium und Blei wurden durch Atomabsorptionsspektrometrie jeweils als Gesamtgehalte im sauren Mikrowellenaufschluss nach DIN EN 12498:2018 bestimmt.

3.4. Durchführung der Laboranalysen

Für die grafischen und die braunen Altpapiersorten wurden unterschiedliche Versuchspläne erstellt. Dies trägt zum einen der Tatsache Rechnung, dass es viel zu zeitaufwändig wäre, alle Untersuchungen an allen Altpapierproben durchzuführen. Zum anderen werden so auch nur die für die jeweilige Sorte relevanten Prüfungen durchgeführt. So werden bei den grafischen Altpapiersorten beispielweise mehr optische Eigenschaften erfasst, während bei den braunen Sorten mehr Untersuchungen im Bereich der mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden.

Als erste Prüfung wurde an jeder Probe der Feuchtegehalt gemessen. Anschließend wurde mittels manueller Sortierung die Zusammensetzung der Proben bestimmt. Hierfür wurden die Kategorien grafische Papiere, Verpackungspapiere und Karton, sowie ungeeignete/sonstige Papiere und Pappen und papierfremde Stoffe in geeignete Unterklassen eingeteilt und jedes Objekt der Probe einer dieser Unterklassen zugeordnet. Jede einzelne Unterklasse wurde am Ende der Sortierung gravimetrisch vermessen. Eine grundlegende Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der nachfolgenden Untersuchung war die Herstellung einer repräsentativen, homogenen Stoffsuspension aus der lufttrockenen Altpapierprobe. Hierfür wurden 40 kg der Probe (ohne papierfremde Stoffe) im PMV-Technikumspulper mit 1000 Liter Wasser bei einer Temperatur von etwa 50 °C für eine Zeitdauer von etwa 10 min bei 70 % der maximalen Motorleistung homogenisiert, sodass sich in der entstehenden Stoffsuspension eine Stoffdichte von etwa 4 % einstellte. Aus dem Pulper wurden etwa 30 Liter entnommen und im Escher Wyss-Laborpulper für ungefähr 25 min desintegriert. Für alle weiteren Analysen wurde der Stoff auf eine Stoffdichte von ca. 0,5 % verdünnt und in einem Verteilergerät bereitgestellt.

Für die grafischen Sorten 1.11 und 3.10 wurden Deinking-Versuche durchgeführt und anschließend optische Eigenschaften sowohl am deinkten als auch am undeinkten Stoff gemessen. Das gesamte Analysekonzept ist in Abb. 3 dargestellt. Bei den beiden Altpapiersorten 1.02 und 1.04 kam ein ähnliches Analysekonzept zum Einsatz, das in Abb. 4 zu sehen ist. Die Bewertung der Deinkbarkeit spielt bei diesen Sorten keine Rolle und wurde somit nicht durchgeführt. Wichtige Qualitätsparameter sind hier stattdessen die mechanischen Eigenschaften SCT, RCT und CMT, die nur bei diesen beiden Papiersorten an den gebildeten Laborblättern gemessen wurden.

Tab. 1 zeigt alle untersuchten Qualitätsparameter einschließlich der Aussage, ob diese für die grafischen Altpapiersorten bzw. die braunen Altpapiersorten gemessen wurden.

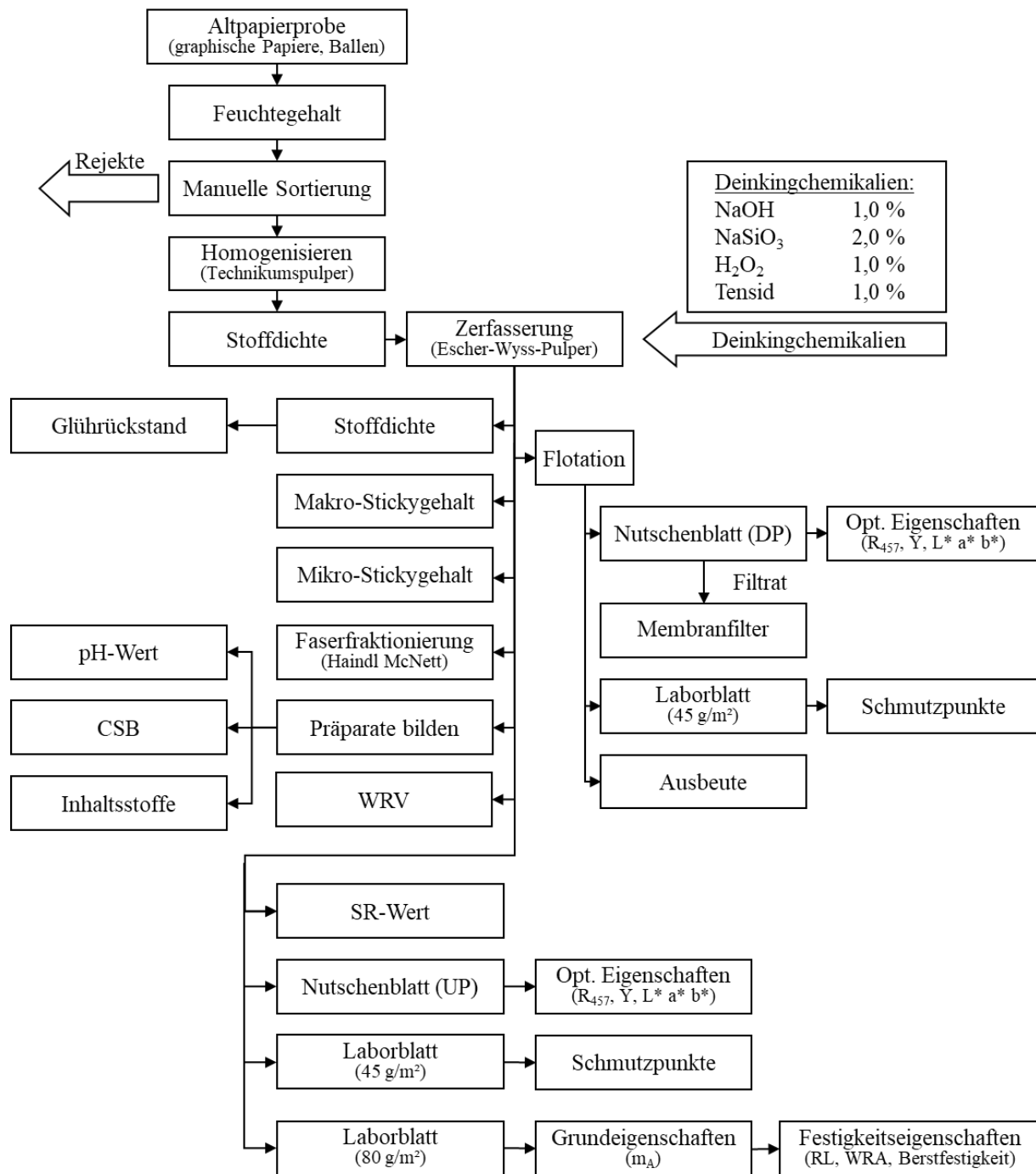


Abb. 3: Analysekonzept der untersuchten grafischen Altpapiersorten 1.11 und 3.10

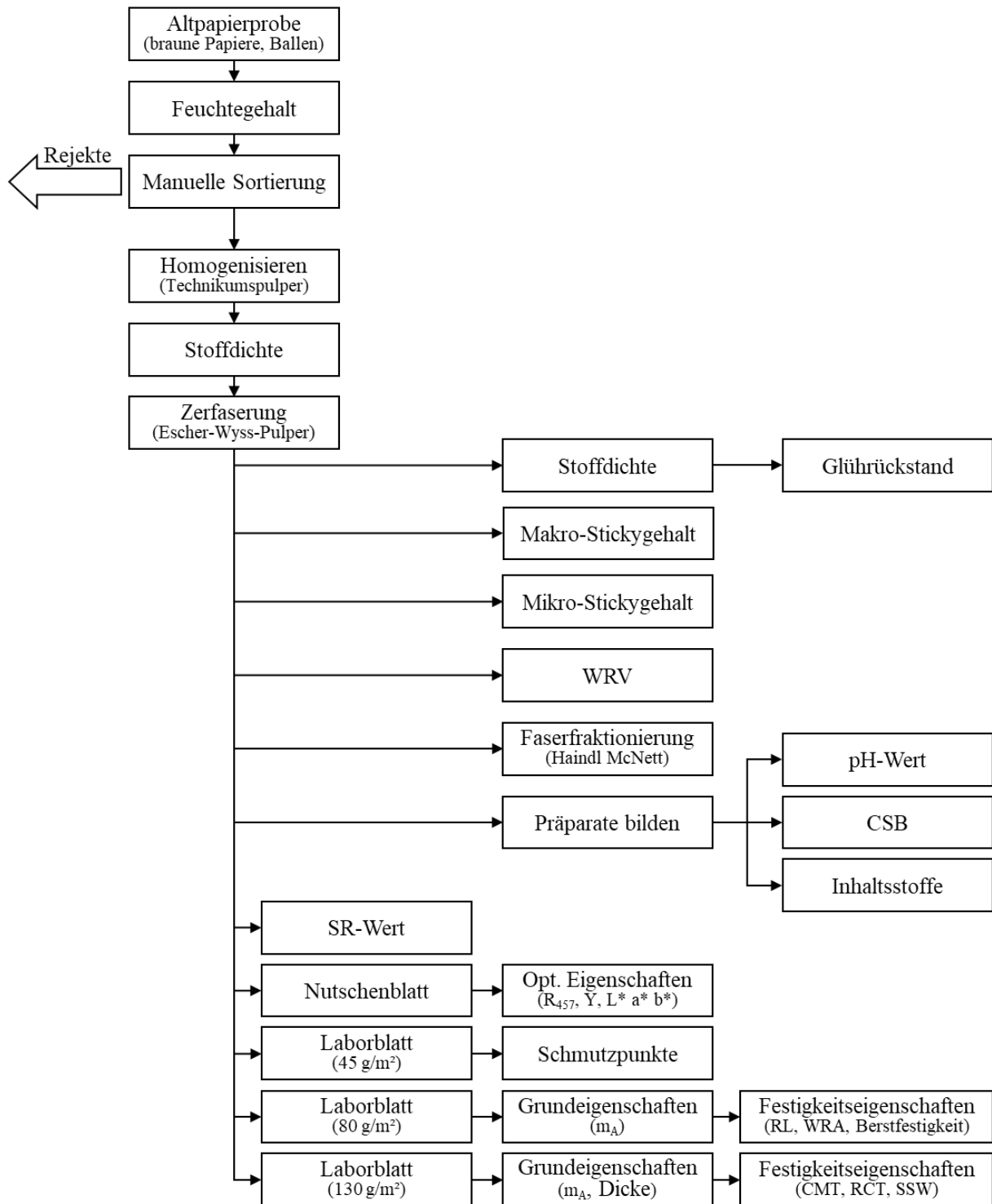


Abb. 4: Analysekonzept der untersuchten braunen Altpapiersorten 1.02 und 1.04

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Qualitätsparameter

Abk.	Parameter	Grafische AP-Sorten	Braune AP-Sorten
Grundeigenschaften			
FG	Feuchtigkeitsgehalt	X	X
Zusammensetzung:		X	X
VPK	Verpackungspapiere und Karton	X	X
GP	Grafische Papiere	X	X
U/SPP	Ungeeignete/sonstige Papiere und Pappen	X	X
PFS	Papierfremde Stoffe	X	X
VZH	Verhältnis von Zellstoff zu Holzschliff	X	X
Suspensionseigenschaften			
Asche	Aschegehalt 575° C, 900° C (auch Glührückstand)	X	X
EWV	Entwässerungsverhalten (Schopper-Riegler-Wert)	X	X
WRV	Wasserrückhaltevermögen	X	X
Sp150	Splittergehalt (// 150 µm), Haindl-McNett	X	X
R30	Rückstand 30er Sieb, Haindl-McNett	X	X
R50	Rückstand 50er Sieb, Haindl-McNett	X	X
R100	Rückstand 100er Sieb, Haindl-McNett	X	X
R200	Rückstand 200er Sieb, Haindl-McNett	X	X
D200	Durchgang 200er Sieb, Haindl-McNett	X	X
Stickys	Makro-Stickygehalt, massenbezogene Fläche	X	X
	Makro-Stickygehalt, massenbezogene Anzahl	X	X
	Mikro-Stickygehalt mit Flow-Cytometrie	X	X
Optische Eigenschaften			
SMZpkt	Schmutzpunkte	X	X
R ₄₅₇	Weißer/Weißgrad	X	X
Y	Hellbezugswert	X	X
L*	Farbmaßzahl im CIE – System, Helligkeit	X	X
a*	Farbmaßzahl im CIE – System, Grün (-) — Rot (+)	X	X
b*	Farbmaßzahl im CIE – System, Gelb (-) — Blau (+)	X	X
ERIC		X	
Ausbeute		X	
Grundeigenschaften und mechanische Eigenschaften			
m _A	Flächenbezogene Masse (80 g/m ² , 130g/m ²)	X	X, X
Dicke	Dicke (80 g/m ² , 130g/m ²)	X	X
RL	Reißlänge (80 g/m ²)	X	X
Bersth.	Bersthfestigkeit (80 g/m ²)	X	X
WRA	Weiterreißarbeit (80 g/m ²)	X	X
RCT	Ringstauchwiderstand (130 g/m ²)		X
CMT	Flachstauchwiderstand (130 g/m ²)		X
SCT	Streifenstauchwiderstand (130 g/m ²)		X
Chemische Inhaltsstoffe			
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	X	X
OX	Organische Halogenverbindungen	X	X
PCP	Pentachlorphenol	X	X
	Phthalate	X	X
KB	Kationischer Bedarf	X	X
SM	Schwermetalle	X	X

4. Ergebnisse und Diskussion der Altpapier-Studie

4.1. Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtegehalt, insbesondere der braunen Sorten ist u. a. auch von der Witterung abhängig, da die Ballen häufig unter freiem Himmel lagern. Bei der Deinkingware findet die Lagerung in vielen Fällen in einer Halle oder zumindest unter einem Dach statt, sodass diese Sorte in der Regel im Durchschnitt etwas weniger feucht ist. Dies zeigt sich auch in den gemessenen Werten in Abb. 5. Während bei den Sorten 1.02 und 1.04 seit 1984 im Durchschnitt immer über 10 % Feuchtegehalt gemessen wurden, lag der Wert für 1.11 meistens unter dem in der Altpapiersortenliste festgelegten Grenzwert. Diese trifft auch für die aktuellen Werten von 2018 zu. Der Feuchtegehalt der Sorte 3.10 liegt deutlich unter dem der anderen drei untersuchten Sorten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei Multidruck meist um Druckereiabfälle handelt, die in den Druckereien gesammelt und anschließend direkt gepresst und weiterverkauft werden und somit nicht der Witterung ausgesetzt sind.

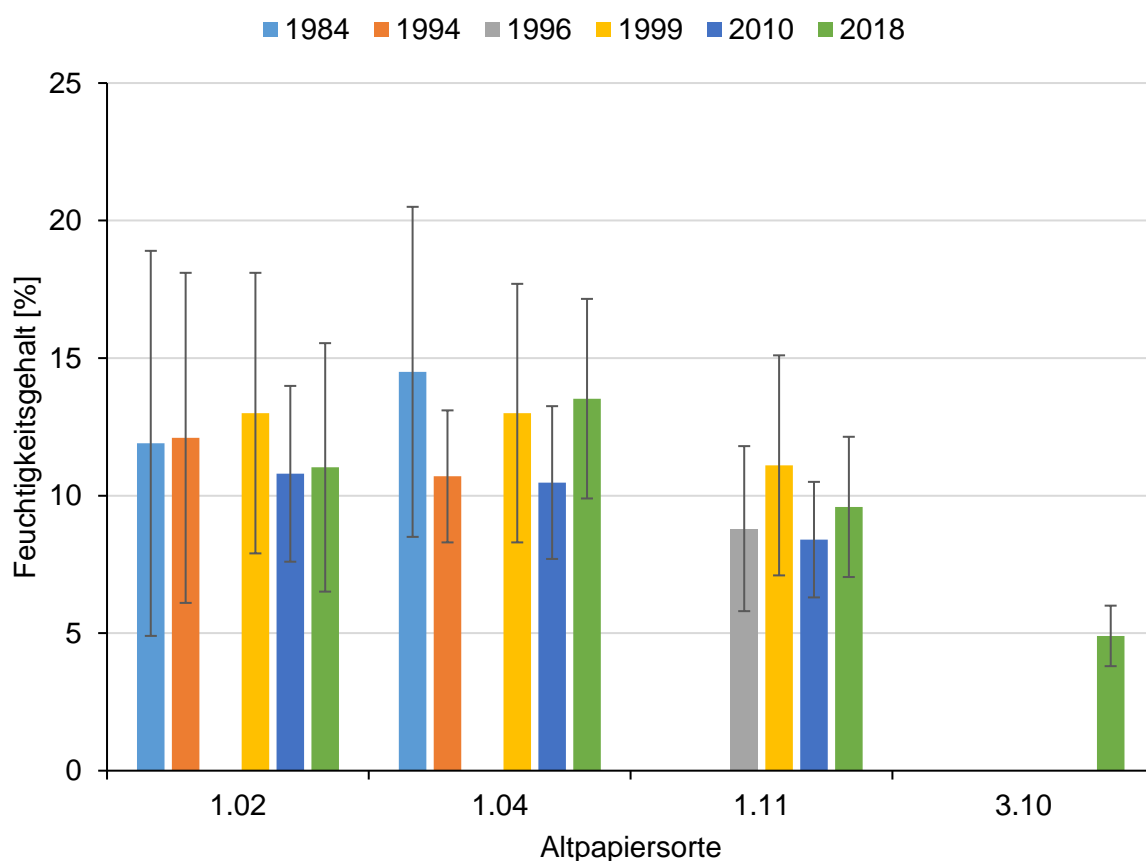


Abb. 5: Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten Altpapiersorten im Zeitraum von 1984 bis 2018

4.2. Zusammensetzung

Die Zusammensetzung wurde nur für die drei Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 im Detail analysiert, da die Proben der Sorte 3.10 zu quasi 100 % nur aus Druckereiabfällen bestanden. Abb. 6 zeigt die Zusammensetzung der drei Sorten mit einem groben Raster, bei dem nur nach grafischen Papieren, Verpackungen, sonstigen Papieren und papierfremden Stoffen unterschieden wird. Die Sorte 1.11 besteht zu 93 % aus grafischen Papieren und entspricht damit in vielen Fällen nicht den Vorgaben der Altpapiersortenliste, die mindestens 97,5 % grafische Papiere fordert. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Sorte 1.04. Hier fordert die Altpapiersortenliste 97 % Verpackungen. Im Mittel ergab sich bei den untersuchten Proben ein Anteil von 84 %. Bei der Sorte 1.02 fiel insbesondere der hohe Anteil an grafischen Papieren auf. Mit 64 % war dieser mehr als doppelt so hoch wie der Anteil an Verpackungen.

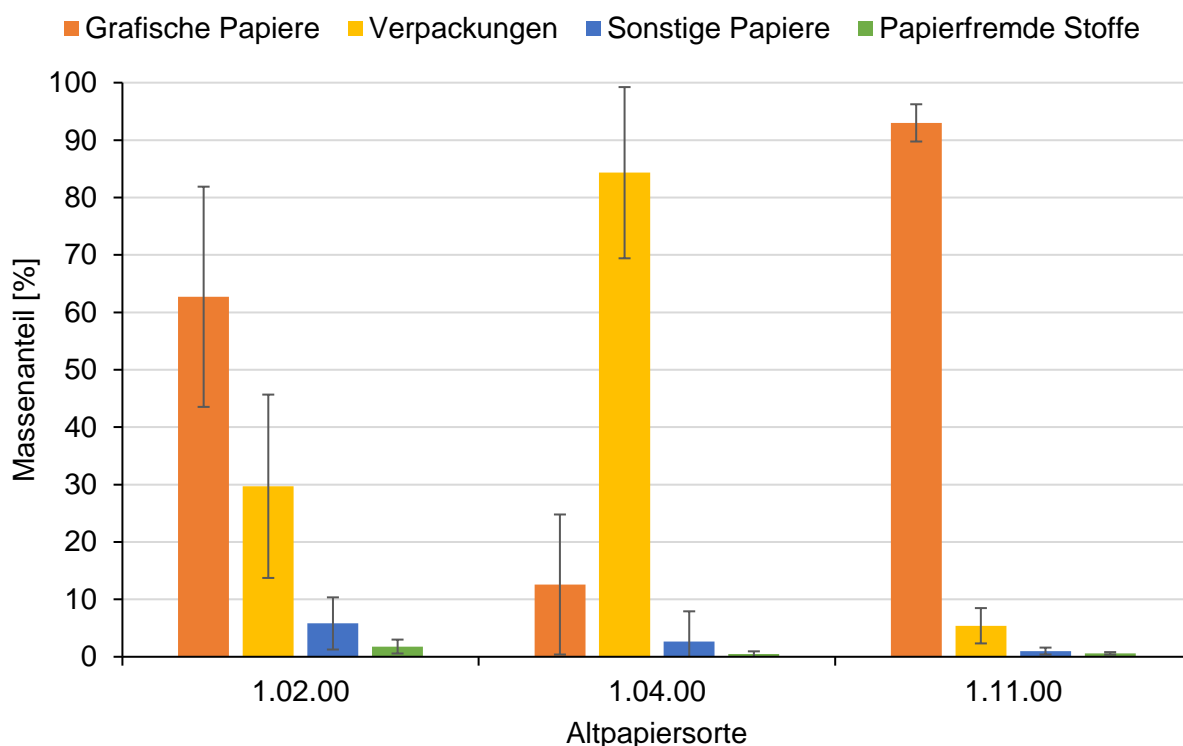


Abb. 6: Zusammensetzung der untersuchten Altpapiersorten 2018

Abb. 7 gibt einen Einblick in die Entwicklung des Anteils der grafischen Papiere an den untersuchten Sorten. Es zeigt sich, dass für die Deinkingware im Rahmen der Messgenauigkeit seit 1984 der Anteil an grafischen Papieren konstant geblieben ist. Bei der Sorte 1.04 zeigt sich eine besonders große Streubreite. Diese schwankt von quasi keinen grafischen Papieren bis hin zu etwa 30 % Massenanteil. Im Mittel liegt der Wert aber unter dem Niveau von 2010. Bei dem gemischten Altpapier konnte im Durchschnitt ein Anstieg der grafischen Papiere um 8 % verzeichnet werden. Zu beachten ist aber auch hier die große Streubreite.

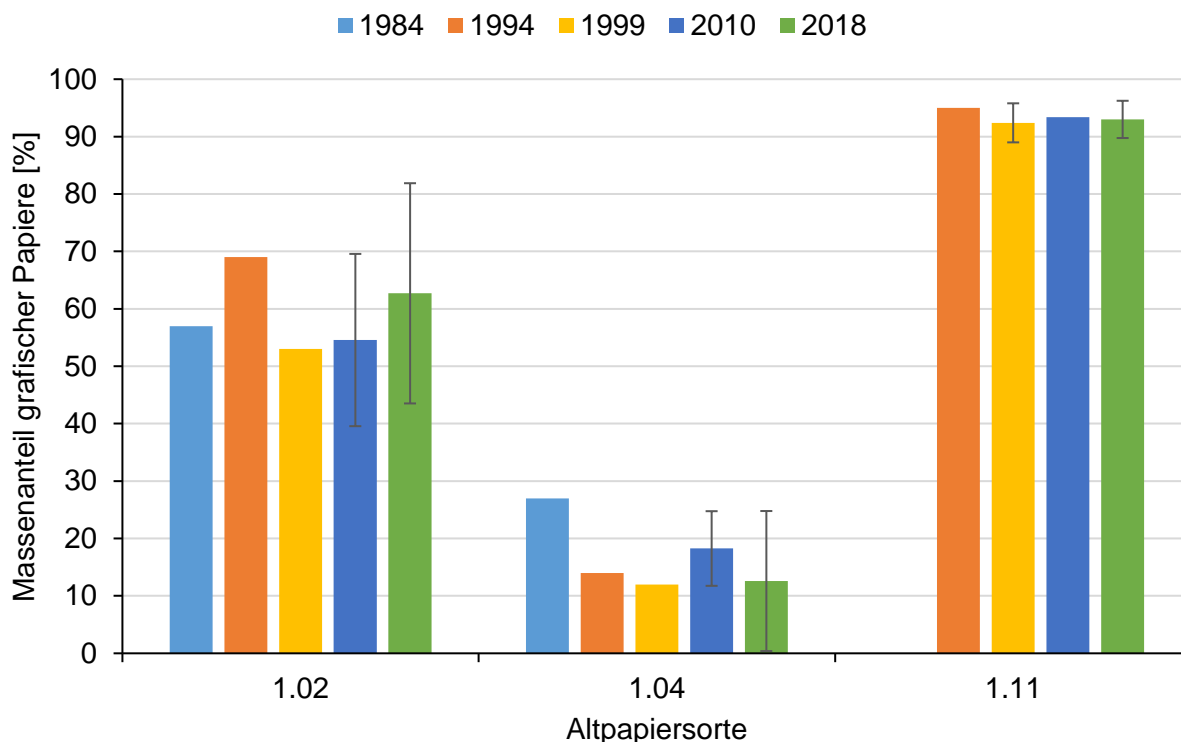


Abb. 7: Anteil der grafischen Papiere in den untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

Betrachtet man in Abb. 8 den Anteil an nicht deinkbaren Papieren in der Deinkingware 1.11, erkennt man, dass dieser, wie bereits erwähnt, nicht den Vorgaben der Altpapiersortenliste entspricht, aber seit der letzten Untersuchung im Jahre 2010 quasi unverändert ist.

Der Anteil an papierfremden Stoffen ist für alle untersuchten Sorten in Abb. 9 noch einmal explizit dargestellt. Rein numerisch betrachtet ist hier ein deutlicher Rückgang für die Sorten 1.02 und 1.04 zu verzeichnen. Für 1.11 ergibt sich ziemlich genau der gleiche Wert wie 2010. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass sich seit der Revision der Altpapiersortenliste im Jahre 2013 die Definition der papierfremden Stoffe konkretisiert hat. Bis 2010 wurde die Definition noch so ausgelegt, dass alle Bestandteile einer Altpapierprobe, die nicht aus Papier bestanden, als papierfremd klassifiziert wurden. Seit der Revision der Norm gilt nur noch das Fremdmaterial als papierfremd, „welches kein Bestandteil des Produktes ist und welches vorher aussortiert werden kann“. Klebebänder, die auf Papierverpackungen angebracht sind, zählen nach dieser Definition genauso wenig zu der papierfremden Fraktion wie die Kunststofffenster in Briefumschläge und weitere ähnliche Beispiele. Dies erklärt den deutlichen Rückgang bei den Sorten 1.02 und 1.04, da bei der aktuellen Untersuchung die neuste Definition der Norm angewandt wurde. Unter Anwendung der alten Definition hätte sich für die Sorte 1.11 der Anteil an papierfremden Bestandteilen somit sogar erhöht.

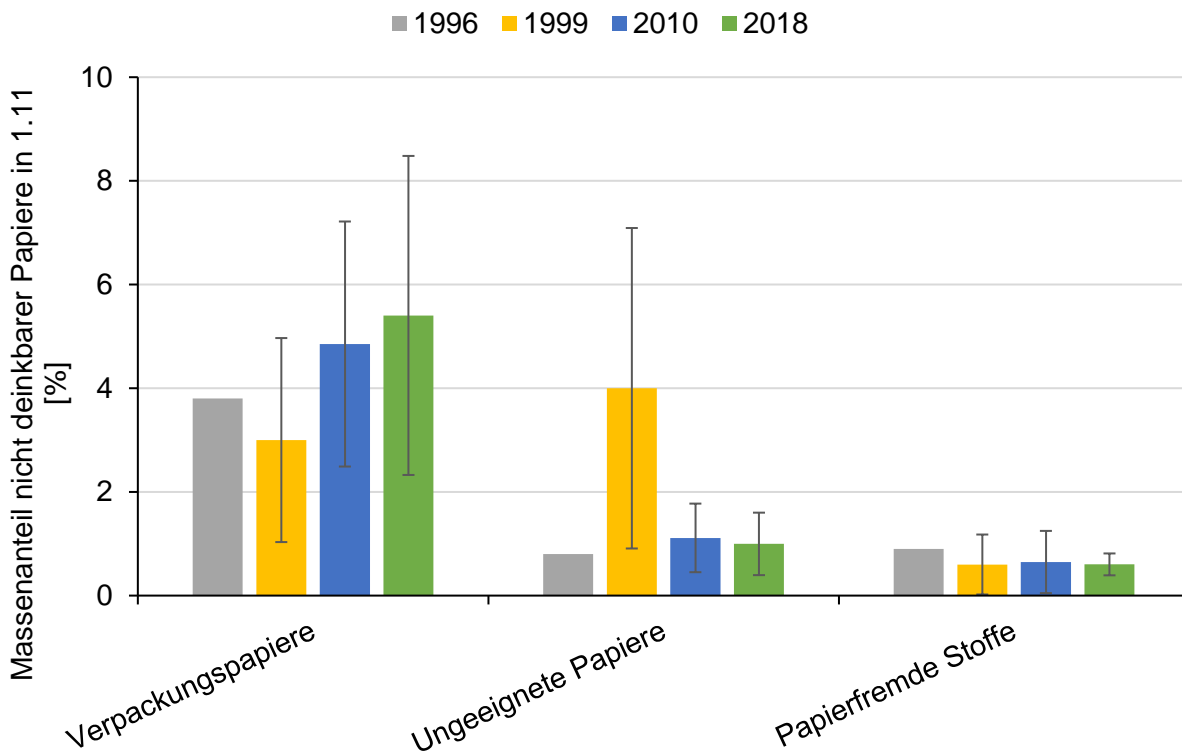


Abb. 8: Anteil nicht deinkbarer Papiere in der Sorte 1.11 von 1996 bis 2018

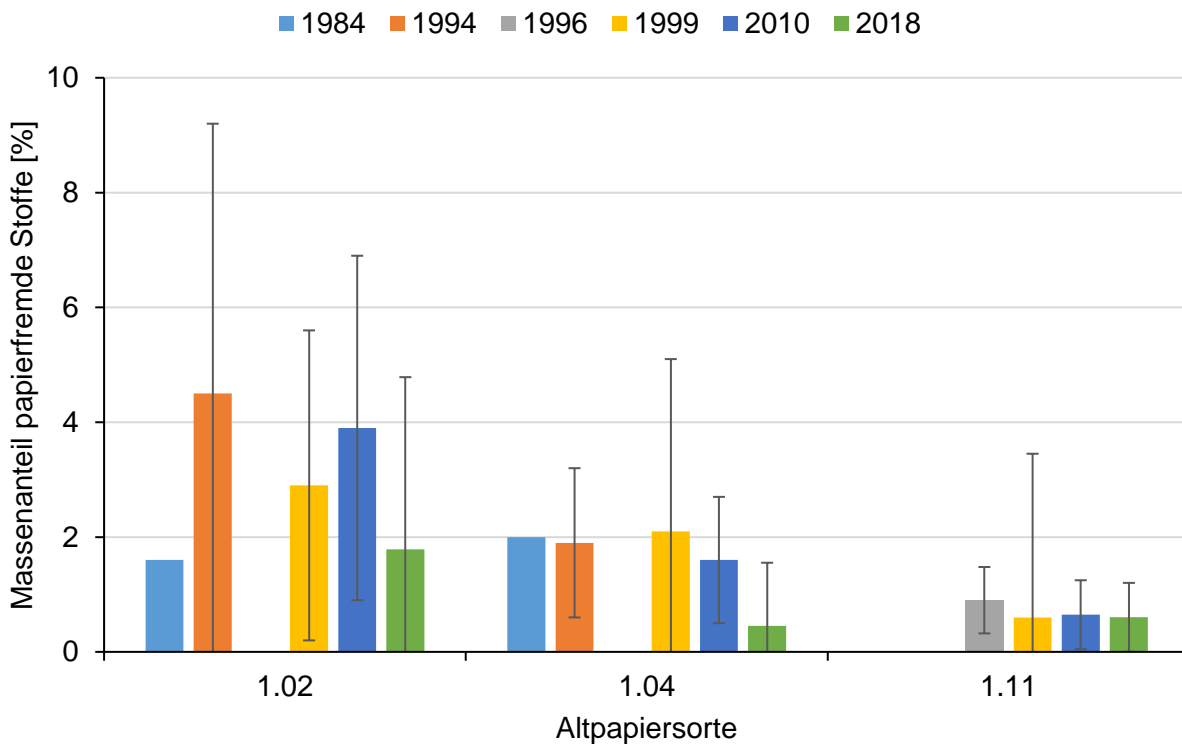


Abb. 9: Anteil der papierfremden Stoffe in den untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

4.2.1. Zusammensetzung der Sorte 1.02 im Detail

Abb. 6 gibt lediglich eine grobe Übersicht über die Zusammensetzung der untersuchten Sorte. In den nachfolgenden Abschnitten soll ein detaillierteres Bild der Sorten aufgezeigt werden. In Abb. 10 und Abb. 11 ist jeweils der prozentuale Massenteil der einzelnen Stoffklassen am Gesamtgewicht der grafischen Papiere bzw. der Verpackungspapiere dargestellt. Unterschieden wurde nach allen Klassen, die im PMV-Sortierkatalog (siehe Anhang) vorgestehen sind. Der grafische Anteil ist dominiert von Werbedrucke, Zeitungen und Magazinen. Büropapiere und Bücher spielen eine eher untergeordnete Rolle. Die Verpackungsfraktion besteht zu über 50 % aus Wellpappen.

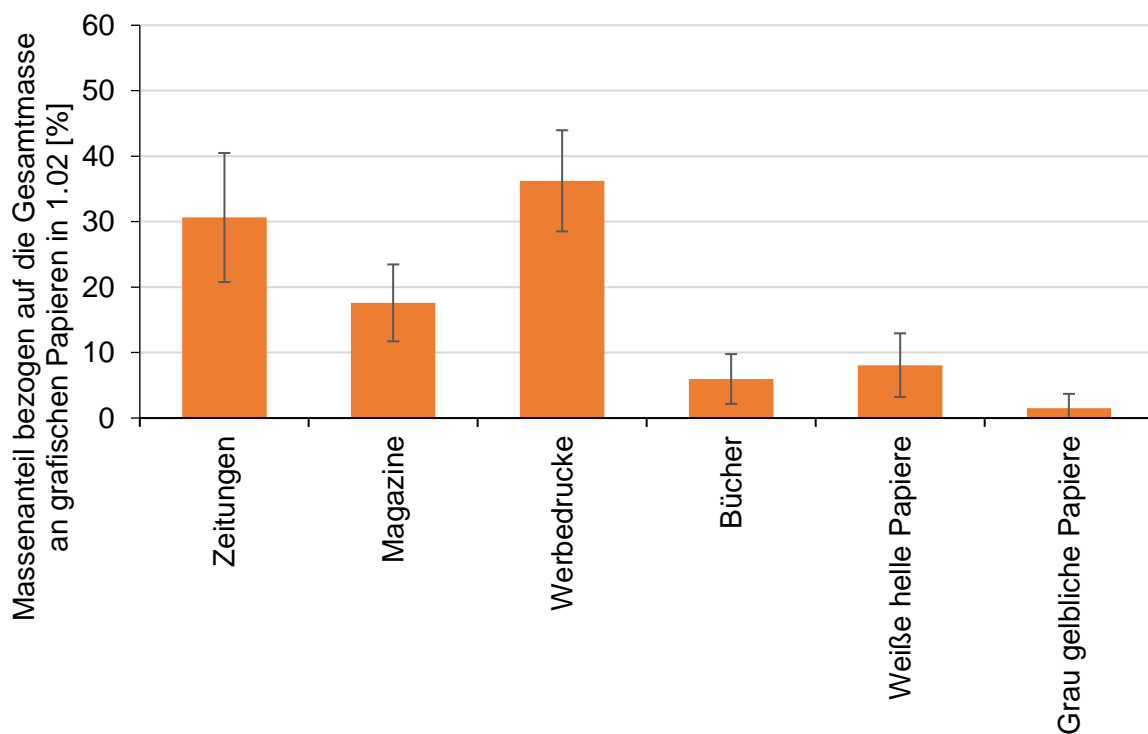


Abb. 10: Detaildarstellung der grafischen Papiere in der Sorte 1.02 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an grafischen Papieren in 1.02)

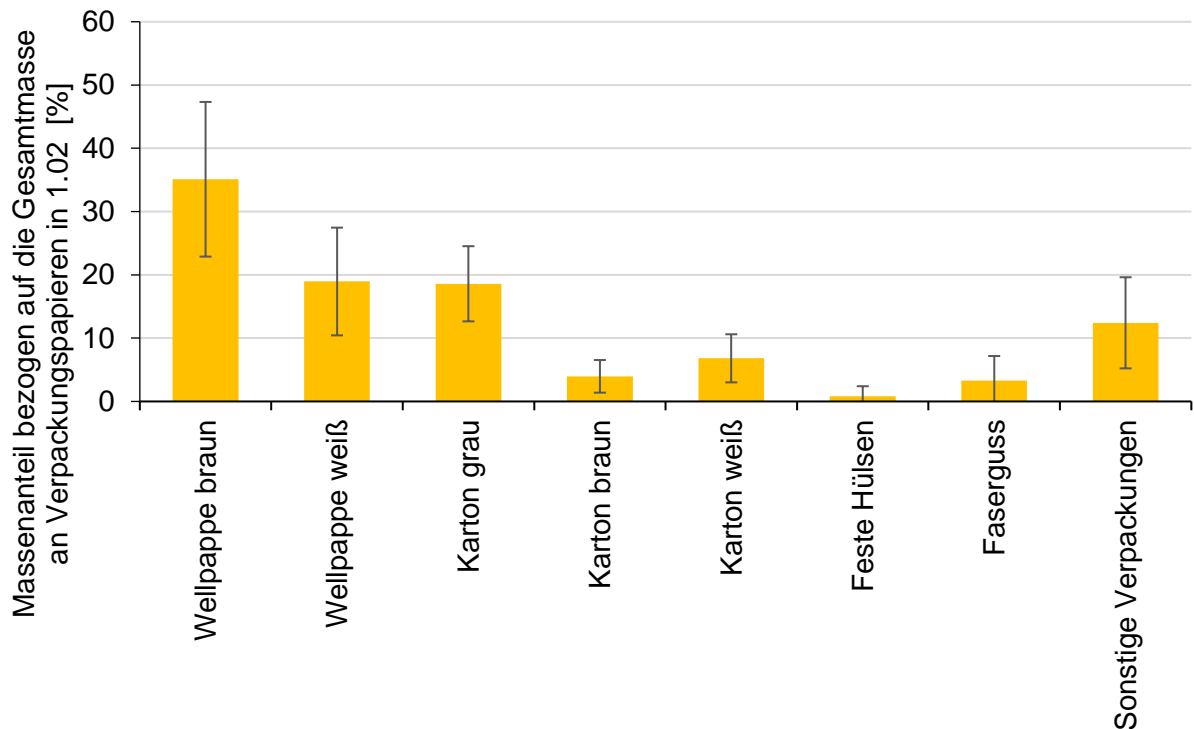


Abb. 11: Detaildarstellung der Verpackungspapiere in der Sorte 1.02 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an Verpackungspapieren in 1.02)

4.2.2. Zusammensetzung der Sorte 1.04 im Detail

Abb. 12 und Abb. 13 zeigen die detaillierte Zusammensetzung der Sorte 1.04. Die Zusammensetzung der grafischen Fraktion ist, verglichen mit den anderen untersuchten Sorten, recht homogen gemischt. Die Verpackungsfraktion besteht zu fast 90 % aus Wellpappen. Dies war zu erwarten, da diese den größten Anteil im Verpackungspapiermarkt einnehmen und aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften (Größe, geringe Durchstoßfestigkeit, Farbe) relativ gut aus dem Altpapierstrom separiert werden können. Außerdem gibt es an entsprechenden Anfallstellen wie beispielsweise Supermärkten Monostromsammlungen, die zu fast 100 % aus Wellpappen bestehen und die so gesammelten Verpackungen häufig auch als Sorte 1.04 vermarktet werden.

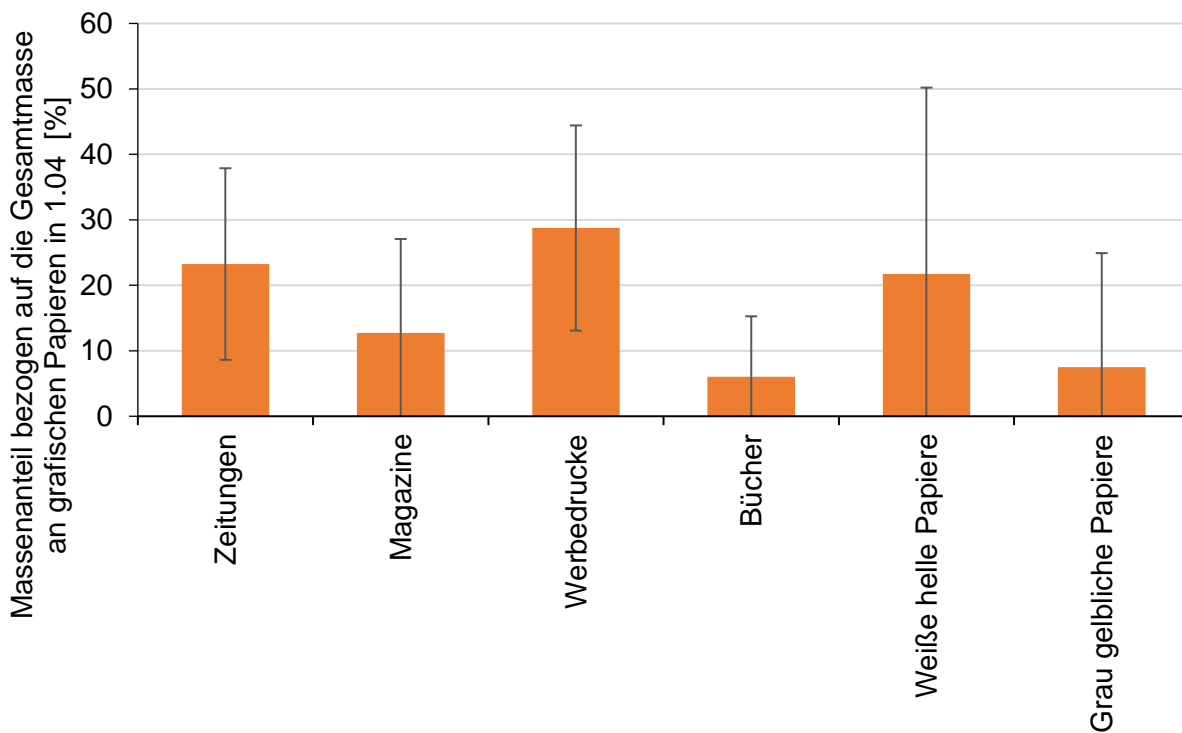


Abb. 12: Detaildarstellung der grafischen Papiere in der Sorte 1.04 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an grafischen Papieren in 1.04)

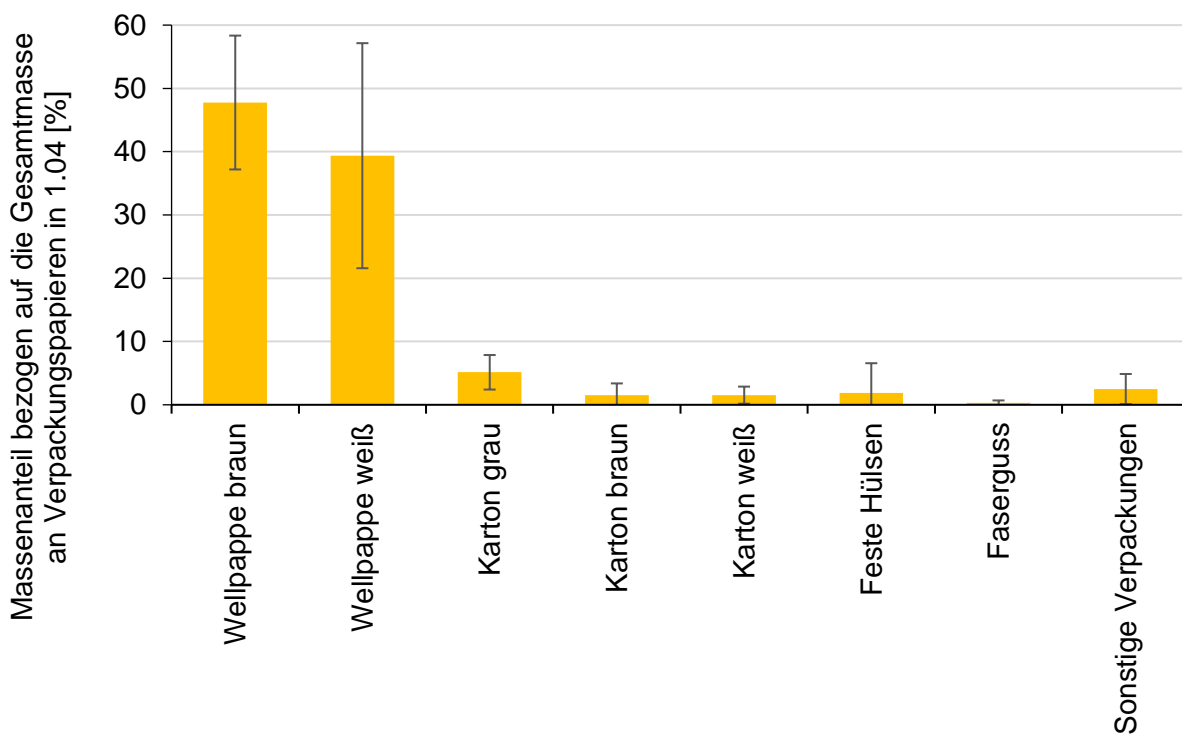


Abb. 13: Detaildarstellung der Verpackungspapiere in der Sorte 1.04 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an Verpackungspapieren in 1.04)

4.2.3. Zusammensetzung der Sorte 1.11 im Detail

Abb. 14 und Abb. 15 zeigt die Zusammensetzung der Sorte 1.11 im Detail. Im grafischen Anteil dominiert die Werbedruckfraktion ganz klar mit fast 50 % Massenanteil. Zeitungen und Magazine folgen mit jeweils etwa 20 %. Zu beachten ist, dass die Fraktion der Verpackungspapiere lediglich 5 % der Gesamtmasse der untersuchten Proben ausmacht und somit die Datenbasis recht dünn ist. Auffällig ist der recht hohe Anteil an Karton von 35 % in der Verpackungsfraktion. Dabei handelt es sich in erster Linie um Faltschachtelkartons, die aufgrund ihrer weißen und bedruckten Deckschicht in Sortieranlagen häufig fälschlicherweise als grafische Papiere eingestuft werden.

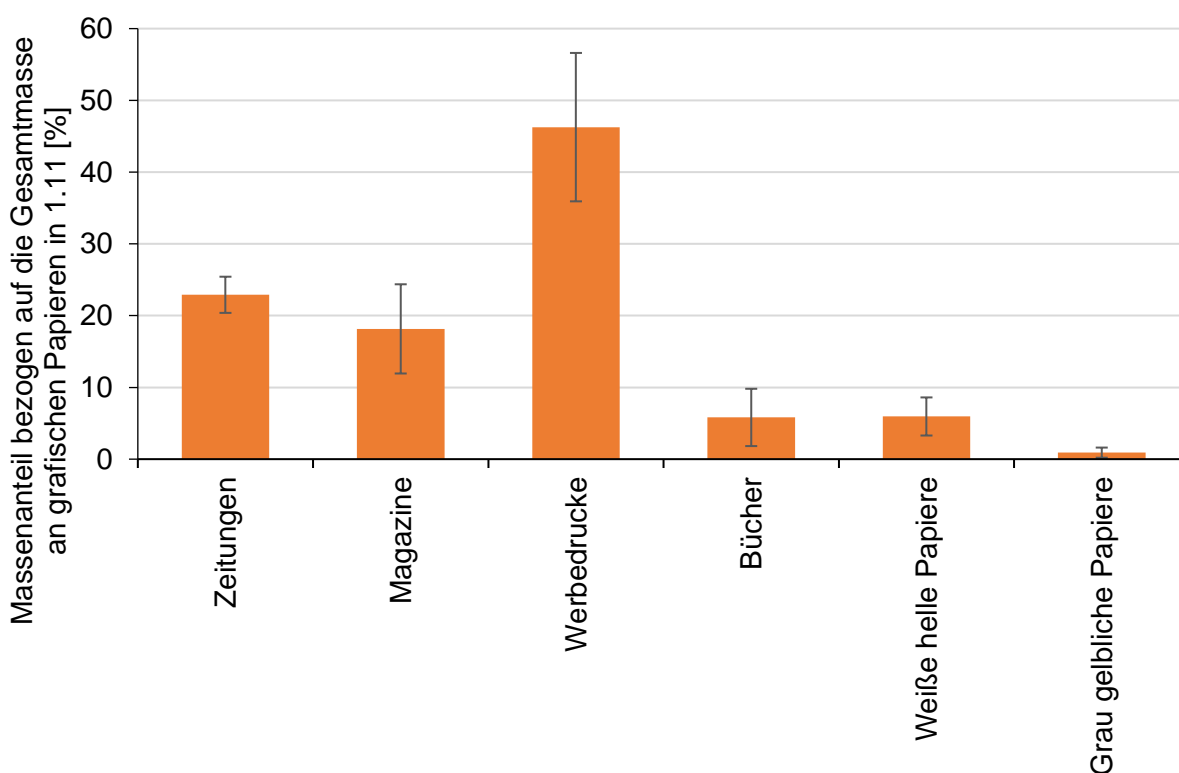


Abb. 14: Detaildarstellung der grafischen Papiere in der Sorte 1.11 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an grafischen Papieren in 1.11)

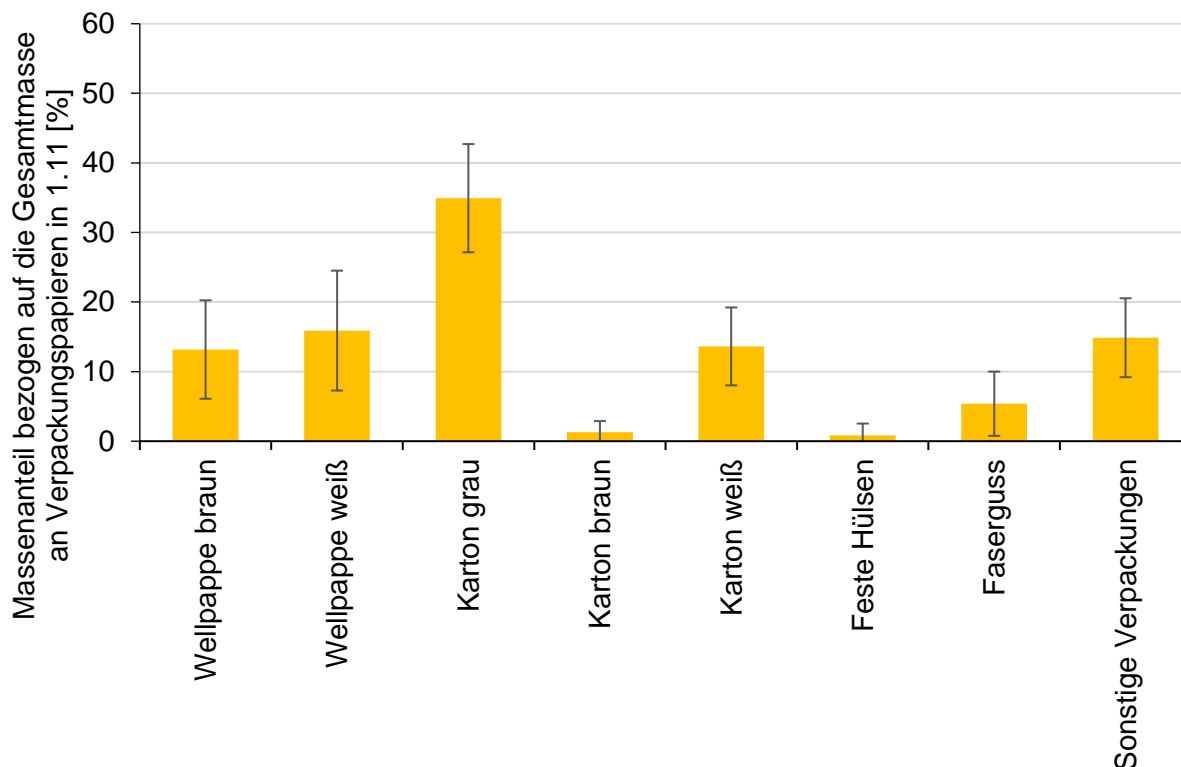


Abb. 15: Detaildarstellung der Verpackungspapiere in der Sorte 1.11 (Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse an Verpackungspapieren in 1.11)

4.3. Suspensionseigenschaften

4.3.1. Aschegehalt

Nach dem Veraschen von Papier verbleiben praktisch alle anorganischen Mineralien, die bei der Produktion der Papierprodukte verwendet wurden, als Glührückstand. Dieser Aschegehalt, auch als Glührückstand oder einfach Asche bezeichnet, ist abhängig von der Zusammensetzung des Altpapiers, von der Art und Menge der eingesetzten Füllstoffe und Streichfarbepigmente und von der gewählten Veraschungstemperatur. Je nach Temperatur und Füllstoff treten unterschiedliche Glührückstände, beispielsweise aufgrund der Zersetzung von Füllstoffen oder des Austreibens von kristallinem Wasser auf. Der Aschegehalt ist daher nur ein Maß für den ursprünglichen Anteil an anorganischen Füllstoffen im Altpapier.

Abb. 16 zeigt die Entwicklung des Aschegehalts in den untersuchten Sorten seit 1984. Bis zur Untersuchung im Jahr 2010 konnte eine kontinuierliche Zunahme des Aschegehalts im Altpapier der Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 festgestellt werden. Dieser Trend wurde in der aktuellen Studie zum ersten Mal durchbrochen. Es konnte kein weiterer signifikanter Anstieg des Aschegehalts festgestellt werden, sodass die Werte immer noch etwa auf dem Niveau des Jahres 2010 geblieben sind. Heute liegt der durchschnittliche Aschegehalt der Sorte 1.02 bei 21 %, bei 17 % für die Sorte 1.04 und bei 24 % für die Sorte 1.11. Einen deutlich höheren Aschegehalt weist die Sorte 3.10 auf. Hier wurde ein durchschnittlicher Aschegehalt von 36 % gemessen. Dies ist darauf

zurückzuführen, dass es sich bei den Papieren in dieser Sorte hauptsächlich um qualitativ hochwertige gestrichene Papiere handelt und damit der Mineralienanteil sehr hoch ist.

Abb. 17 zeigt die gleichen Daten nochmal in anderer Aufbereitung. Hier ist der Aschgehalt über der Zeit aufgetragen. Man sieht, dass sich der Aschgehalt der Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 seit 1984 ähnlich entwickelt hat. Von den 90er Jahren bis 2010 kam es jährlich zu einem durchschnittlichen Anstieg des Aschgehalts von etwa 0,3 %. Diese Entwicklung scheint inzwischen gestoppt.

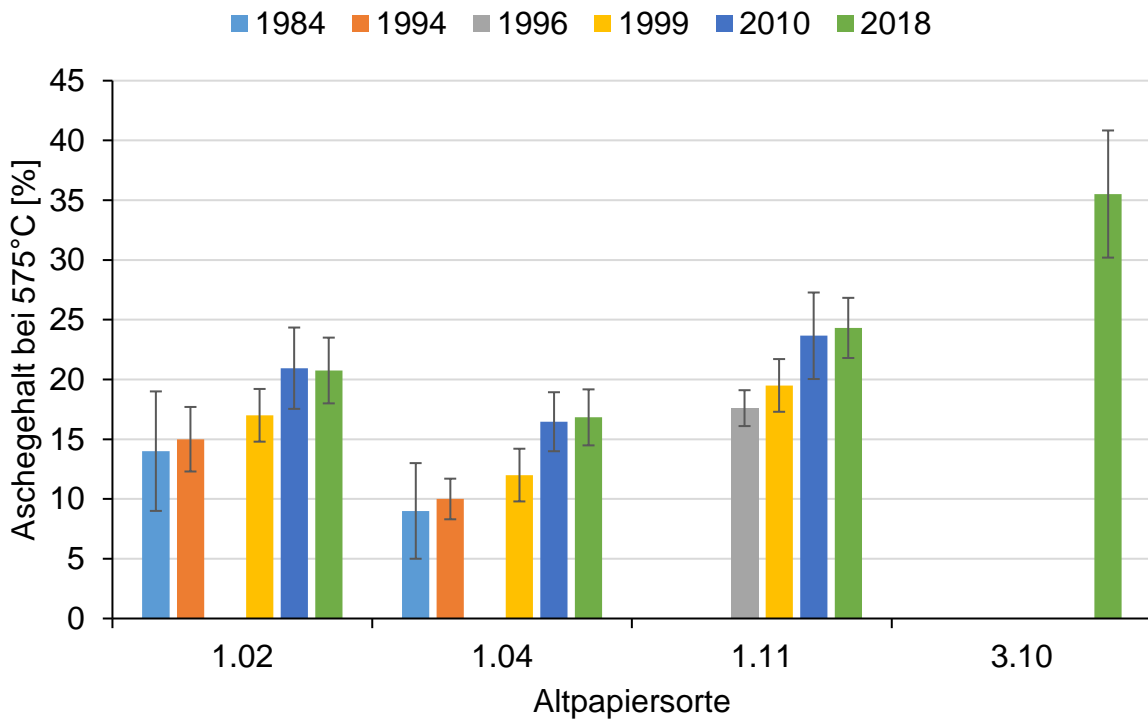


Abb. 16: Aschgehalt der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

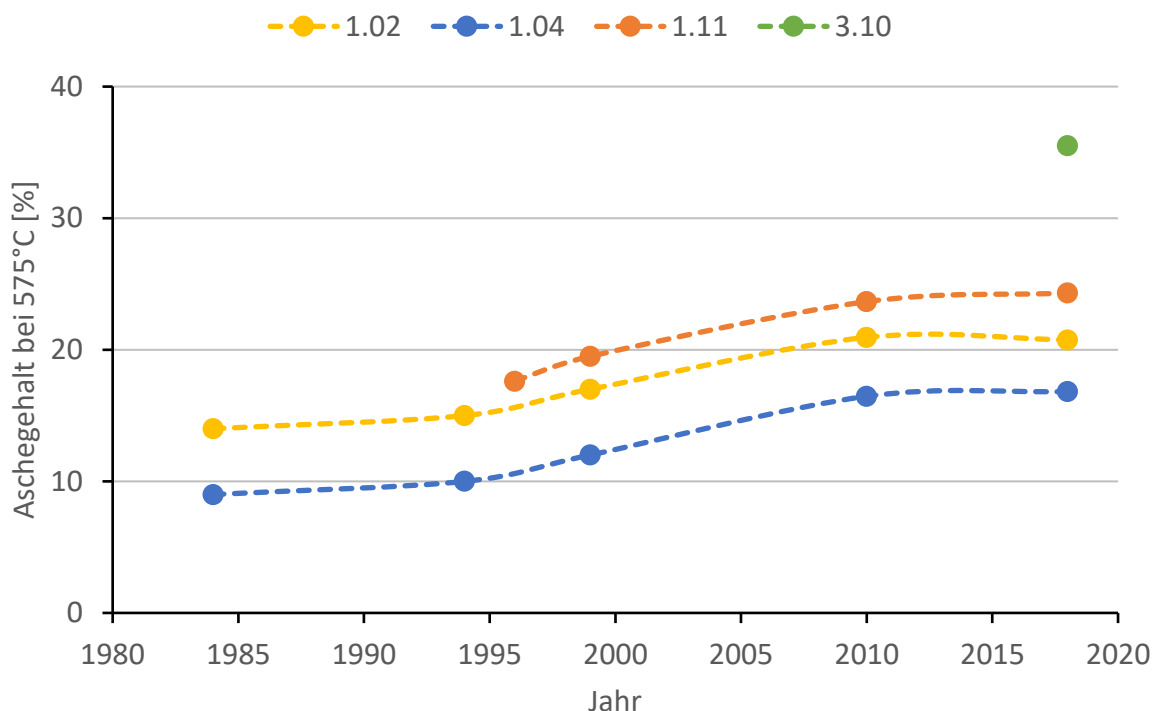


Abb. 17: Aschegehalt der untersuchten Sorten im zeitlichen Verlauf von 1984 bis 2018

4.3.2. Entwässerungsverhalten

Mit dem Schopper-Riegler-Verfahren lässt sich das Entwässerungsverhalten für einen im Wasser suspendierten Faserstoff bestimmen. Abb. 18 zeigt die Entwicklung der Schopper-Riegler-Einheiten. Seit der Untersuchung 1984 haben sich die Schopper-Riegler-Einheiten für die beiden Sorten 1.02 und 1.04 deutlich erhöht. Für 1.02 beträgt der Anstieg fast 50 %, für 1.04 sind es etwa 30 %. Ein Grund hierfür ist der immer weiter geschlossene Altpapierkreislauf. Durch häufigeres Recycling werden die Fasern stärker beansprucht, was zu einem höheren Schopper-Riegler-Einheiten führt. Der besonders große Sprung der Schopper-Riegler-Einheiten von 1.02 ist u. a. auch auf die Zunahme an grafischen Papieren in der Sorte zu erklären, da grafische Papiere höhere Schopper-Riegler-Einheiten aufweisen. Der Mittelwert der Schopper-Riegler-Einheiten für 1.02 liegt bei 52 SR, für 1.04 bei 43 SR und für 1.11 bei 57 SR.

Die Schopper-Riegler-Einheiten von 3.10 sind deutlich niedriger als der der anderen untersuchten Sorten. Die in dieser Sorte enthaltenen Papiere bestehen fast ausschließlich aus Zellstoff. Zellstoff führt in der Regel zu niedrigeren Schopper-Riegler-Einheiten als vergleichbarer Holzstoff. Als Mittelwert ergab sich für die Sorte 3.10 ein Wert von 28 SR.

Das Entwässerungsverhalten nach dem Schopper-Riegler-Verfahren korreliert mit einigen anderen Papiereigenschaften. Abb. 19 zeigt beispielsweise den Zusammenhang zwischen dem mittleren Aschegehalt und den mittleren Schopper-Riegler-Einheiten der Sorten 1.02, 1.04 und 1.11. Es ist ein recht guter linearer Zusammenhang zu erkennen. Ein höherer Aschegehalt ist in der Regel durch einen höheren Anteil an Fein- und Füllstoffen zu erklären. Diese wiederum wirken sich auf das Entwässerungsverhalten aus, da sie dem durchdringenden Wasser kaum einen

Widerstand entgegensetzen. Höhere Aschegehalte führen somit zu höheren Schopper-Riegler-Einheiten.

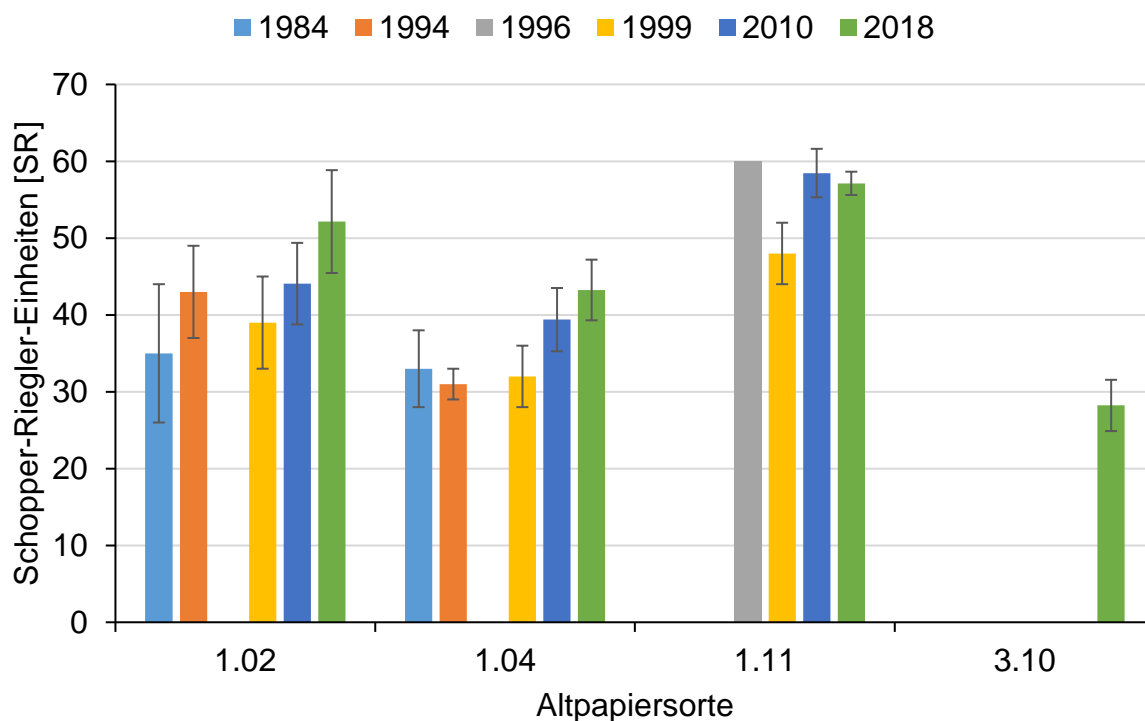


Abb. 18: Schopper-Riegler-Wert der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

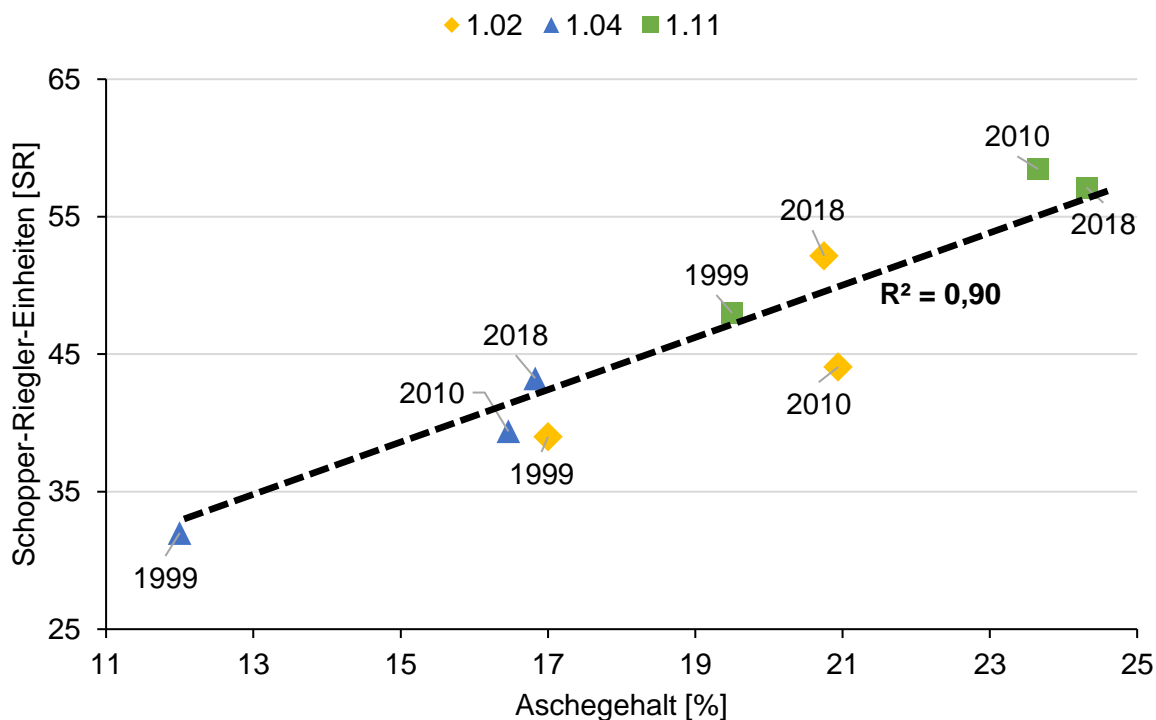


Abb. 19: Korrelation zwischen dem Aschegehalt und dem Entwässerungsverhalten der untersuchten Altpapiersorten von 1999 bis 2018

4.3.3. Wasserrückhaltevermögen

Mit Hilfe des Wasserrückhaltevermögens lassen sich Rückschlüsse über die Quellung der Fasern ziehen. Zur Bestimmung wurde die Methode nach Jayme verwendet. Bei dieser Methode wird die Stoffsuspension in einer Zentrifuge einer extremen Zentrifugalkraft ausgesetzt und so das gesamte Wasser, das mechanisch entfernbar ist, abgetrennt. Die relative Massendifferenz zwischen dem zentrifugierten Stoff und dem anschließend ofengetrockneten Stoff stellt das Wasserrückhaltevermögen dar.

In Abb. 20 ist das Wasserrückhaltevermögen der untersuchten Altpapiersorten dargestellt. Dieser Parameter wurde erst 2010 in den Katalog der Untersuchungen aufgenommen. Generell ist zu erkennen, dass die Werte der aktuellen Studie für die Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 unter den Werten von 2010 liegen. Der Rückgang beträgt jeweils zwischen 7 und 8 %. Das mittlere Wasserrückhaltevermögen liegt für 1.02 und 1.04 bei 96 % und für 1.11 bei 98 %. Bzgl. des Wasserrückhaltevermögens besteht also kaum ein Unterschied zwischen den drei Sorten.

Der niedrige Wert von 72 % für 3.10 im Vergleich zu den anderen Sorten erklärt sich durch den hohen Füllstoffanteil in den Papieren, da Füllstoffe kaum Wasser binden können. Des Weiteren ist das niedriger Wasserrückhaltevermögen auch in Übereinstimmung mit dem geringen Wert für das Entwässerungsverhalten dieser Sorte.

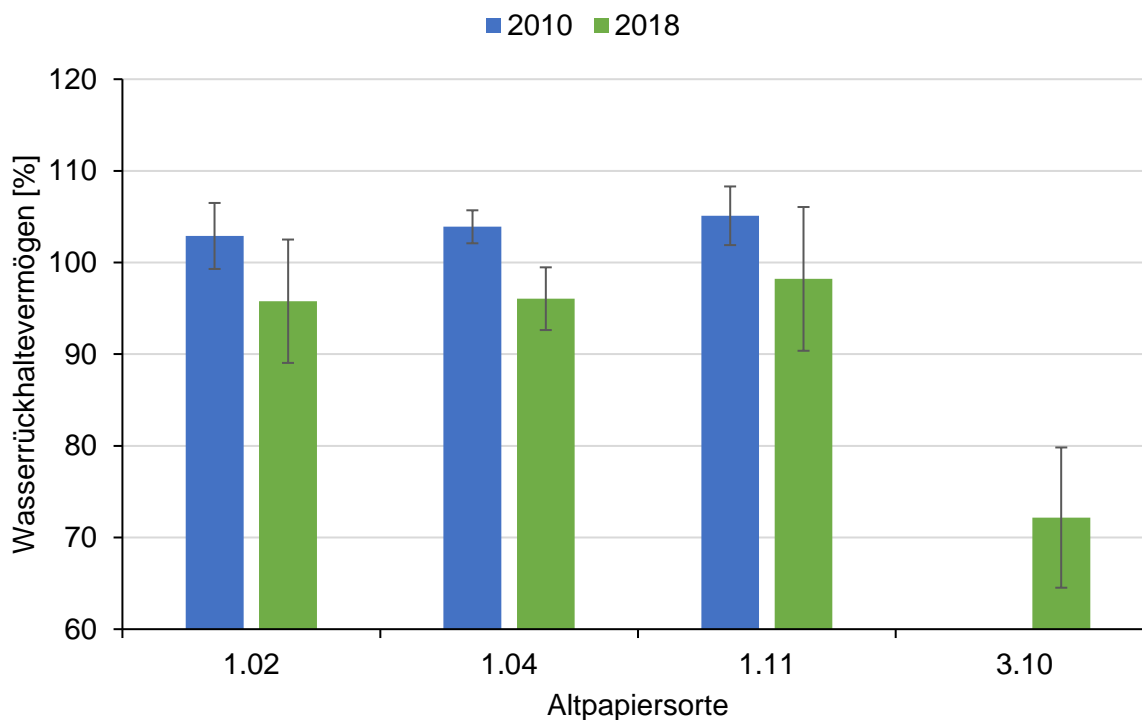


Abb. 20: Wasserrückhaltevermögen für die untersuchten Sorten seit 2010

4.3.4. Faserfraktionierung

Abb. 21 zeigt das Ergebnis der Fraktionierung der untersuchten Sorten mittels des Haindl-McNett-Fraktionators. Mit Hilfe der Masseanteile an langen Fasern und kurzen Fasern sowie an Feinstoffen lassen sich physikalische Eigenschaften der daraus hergestellten Papiere ableiten. Für die dynamischen Festigkeitseigenschaften ist in erster Linie der Anteil an langen Fasern entscheidend, wohingegen Feinstoffe beispielsweise einen Einfluss auf das Entwässerungsverhalten der Papiere hat. Der Anteil an Stippen und Splintern ist für die Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 fast gleich und wurde als Rückstand auf einer 150 µm Schlitzplatte ermittelt. Auch in den Fraktionen R30, R50, R100 und R200 unterscheiden sich die Sorten kaum, wobei 1.04 immer einen kleinen bisschen über dem Niveau der beiden anderen Sorten zu liegen scheint. Beim Durchlauf ergibt sich für 1.04 ein deutlich geringerer Wert, was sich durch den geringeren Füllstoffgehalt in dieser Sorte erklären lässt.

In 3.10 findet man im Mittel kaum Splitter oder Stippen. Im Vergleich zu den anderen Sorten erkennt man auch deutlich weniger lange Fasern in den Fraktionen R30 und R50 und dafür viele kurze Fasern in den Fraktionen R100 und R200. Auch im Durchlauf wurde aufgrund der hohen Füllstoffmenge in den Papieren ein hoher Wert erreicht.

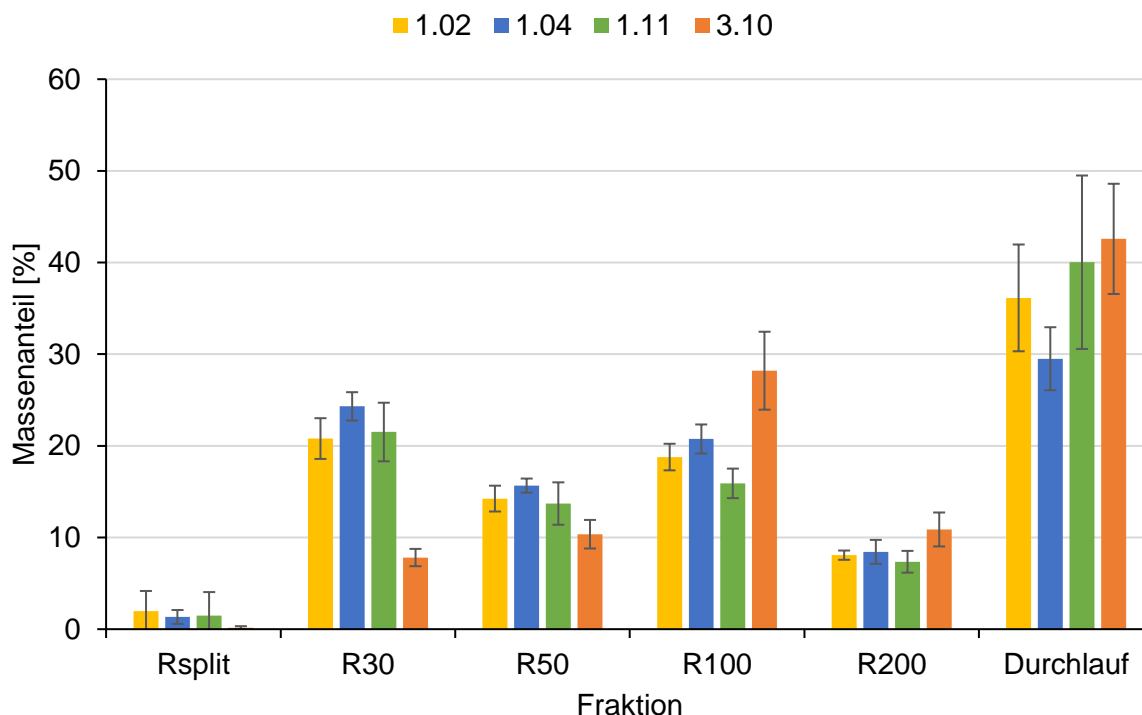


Abb. 21: Faserfraktionierung mittels Haindl-McNett-Gerät der untersuchten Sorten im Jahr 2018

Um die Entwicklung der Faserfraktionen zu beurteilen, sollen die Anteile der Faserfraktionen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen verglichen werden. In den Untersuchungen von 1984 bis 1999 wurde statt des Haindl-McNett-Geräts ein Brecht-Holl-Gerät verwendet. Daher müssen die Fraktionen des Haindl-McNett-Geräts in die Fraktionen des Brecht-Holl-Geräts umgerechnet werden. Hierfür wurde bereits 2010 die in Tab. 2 dargestellte Umrechnungsvorschrift verwendet.

Abb. 22, Abb. 23 und Abb. 24 zeigen die Entwicklung der Massenanteile für den Faserlangstoff, den Faserkurzstoff und den Faserfeinstoff der untersuchten Sorten seit 1984 für die Sorten 1.02, 1.04 und 1.11. Eine Umrechnung der Fraktionen der Sorte 3.10 wurde nicht durchgeführt, weil keine Vergleichswerte für diese Sorte vorhanden sind.

Tab. 2: Einteilung der gemessenen Fraktionen aus dem Heindl-McNett und dem Brecht-Holl-Gerät in die Kategorien Stippengehalt, Faserlangstoff, Faserkurzstoff und Faserfeinstoff in Abhängigkeit der Maschenweiten

Gerät	Stippengehalt	Faserlangstoff	Faserkurzstoff	Faserfeinstoff
Haindl-McNett	4/5 Schlitzplatte (150 µm)	1/5 Schlitzplatte + R30 + 3/4 R50	1/4 R50 + R100 + 1/5 R200	4/5 R200 + D200
Brecht-Holl	Lochplatte (0,7 mm)	Sieb 16	Sieb 50	Eintragsmenge abzüglich der anderen Fraktionen

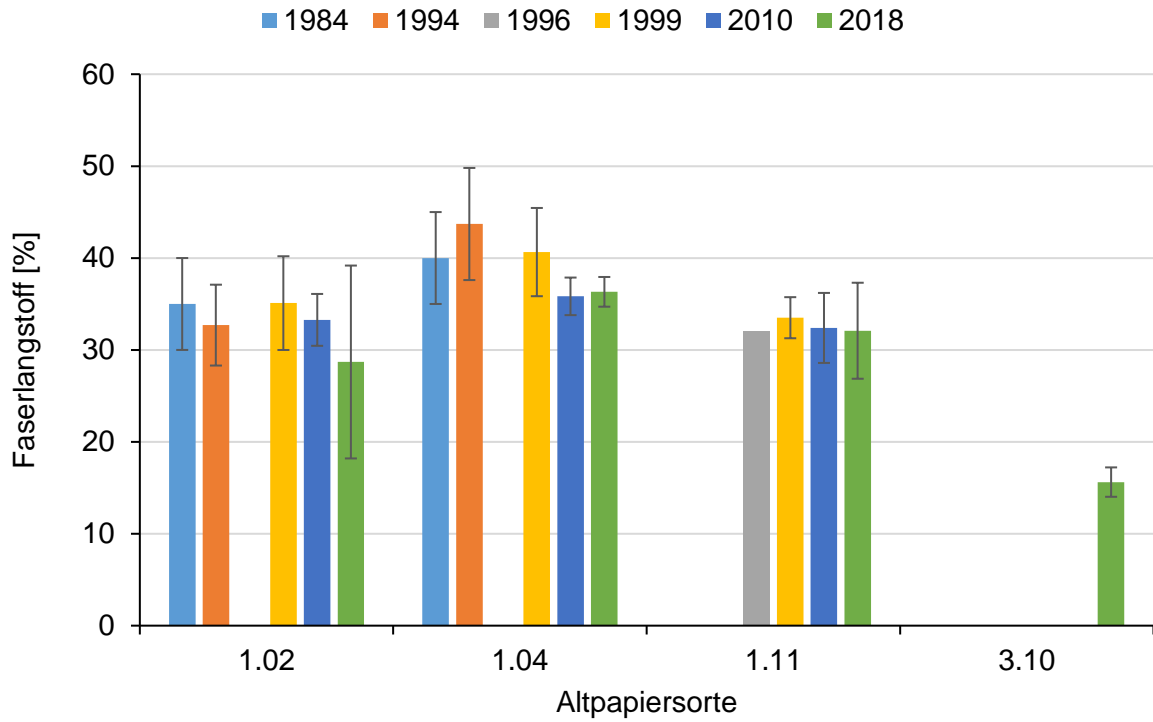


Abb. 22: Faserlangstoff der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

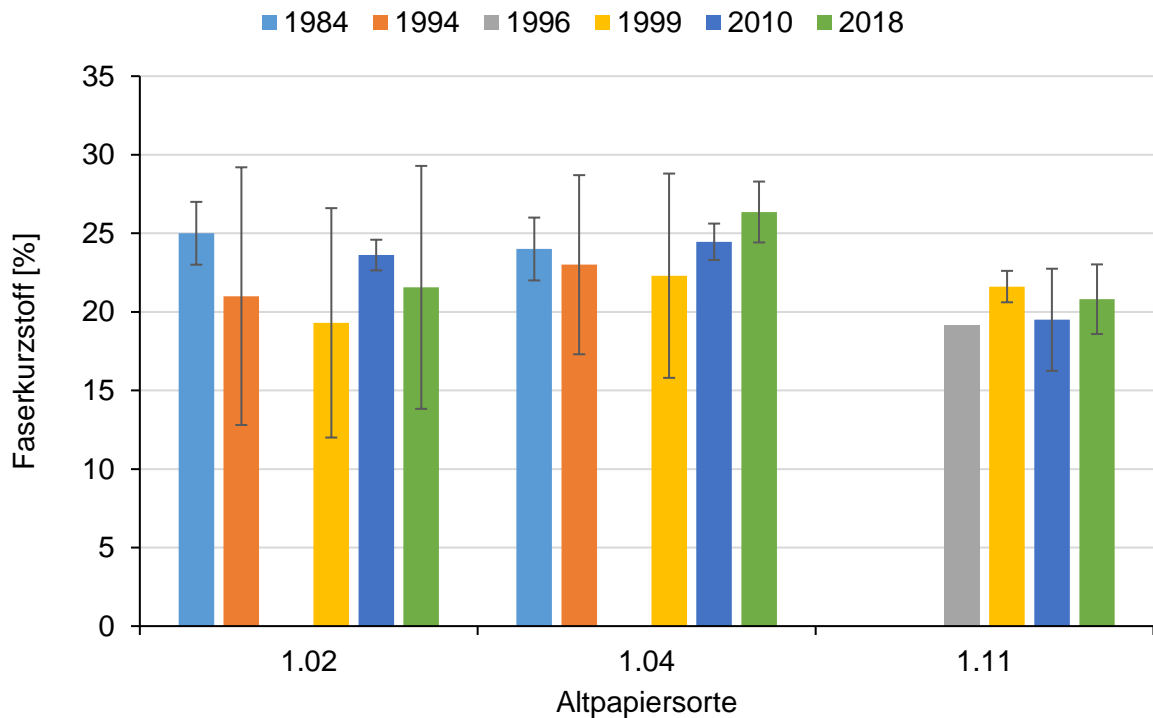


Abb. 23: Faserkurzstoff der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

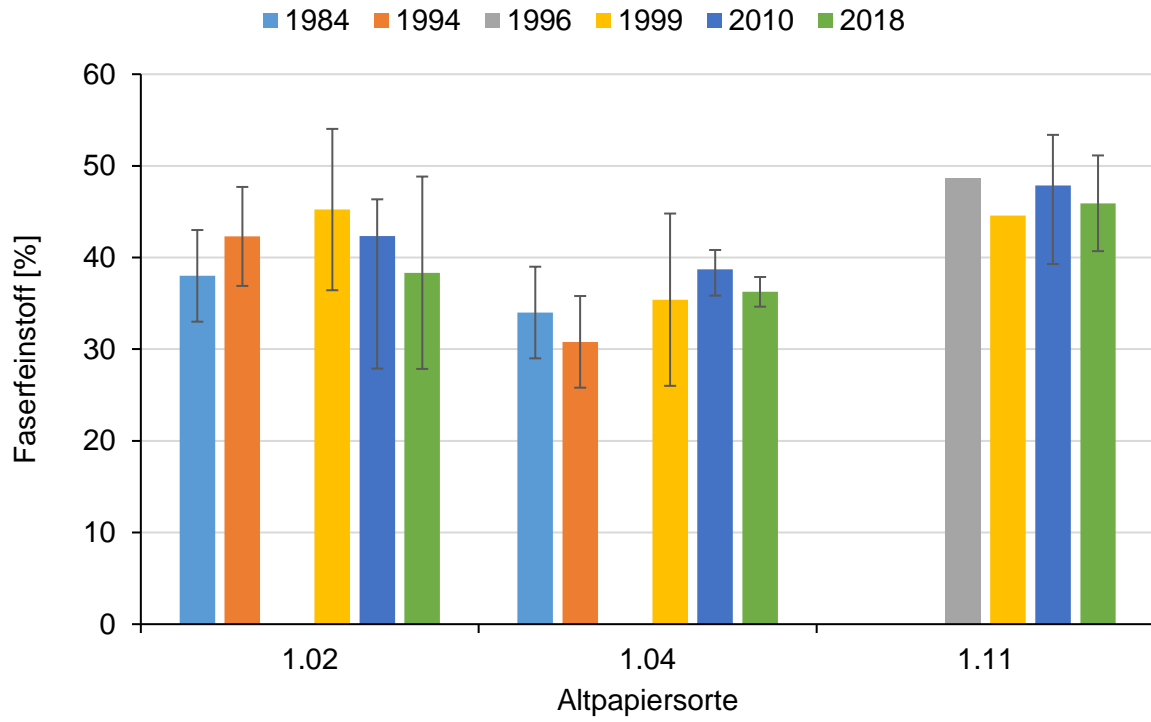


Abb. 24: Faserfeinstoff der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

4.3.5. Makro-Stickygehalt

Der Makro-Stickygehalt wurde nach 1999 und 2010 zum dritten Mal erfasst. Die Ergebnisse sind in Abb. 25 dargestellt. Im Vergleich zu 2010 wurde bei den Sorten 1.02 und 1.04 ein Anstieg des Makro-Stickygehalts festgestellt, wobei der Anstieg bei 1.04 mit 48 % im Vergleich zu 2010 auf 37.000 mm²/kg besonders stark ausfiel. Diese Steigerung ist zum einen auf die Zunahme an Klebeapplikationen im Verpackungsbereich zurückzuführen. Zum anderen landeten aufgrund der geänderten Handhabung der papierfremden Stoffe, die auf die Änderung der Definition nach der Altpapiersortenliste zurückgeht, bei der aktuellen Untersuchung mehr Klebebänder und ähnliches im Pulper als in den vorangegangenen Untersuchungen. Ähnliches gilt wohl auch auf Grund des Verpackungsanteils in abgeschwächter Form für die Sorte 1.02. Der Makro-Stickygehalt der Sorte 1.11 blieb ungefähr auf dem Niveau von 2010 bei 12.000 mm²/kg. Die Sorte 3.10 ist in der Regel fast vollständig frei von Klebstoffanwendung, sodass der geringe Wert von 3.000 mm²/kg nicht verwunderlich ist.

Abb. 26 zeigt die Korrelation zwischen dem Anteil an Verpackungspapieren und Kartonagen und dem Makro-Stickygehalt für die untersuchten Altpapiersorten. Man erkennt deutlich, wie mit steigendem Verpackungsanteil der Makro-Stickygehalt ansteigt. Dies ist, wie bereits erwähnt, darauf zurückzuführen, dass viele Verpackungspapiere und Kartonagen in der Fertigung verklebt oder mit Klebeband und Etiketten beklebt werden. Weitere Eintragsquellen für Stickys sind aber auch beispielsweise eingeklebte Datenträger oder Produktproben in Magazinen.

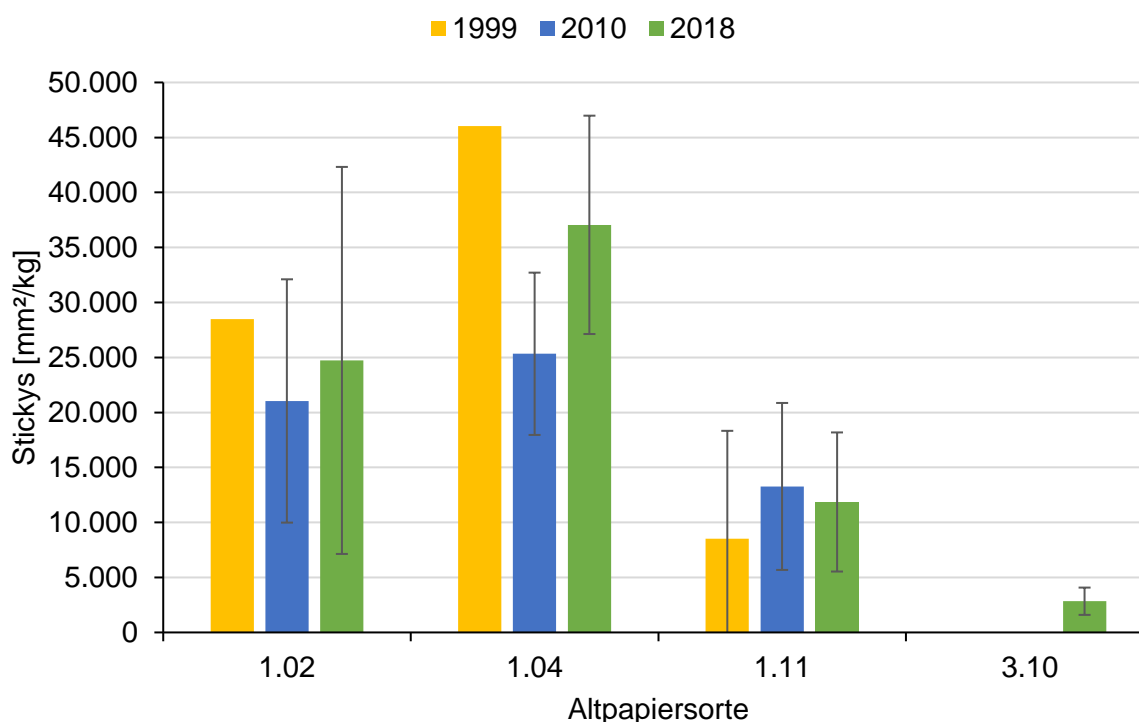


Abb. 25: Makro-Stickygehalt der untersuchten Sorten von 1999 bis 2018

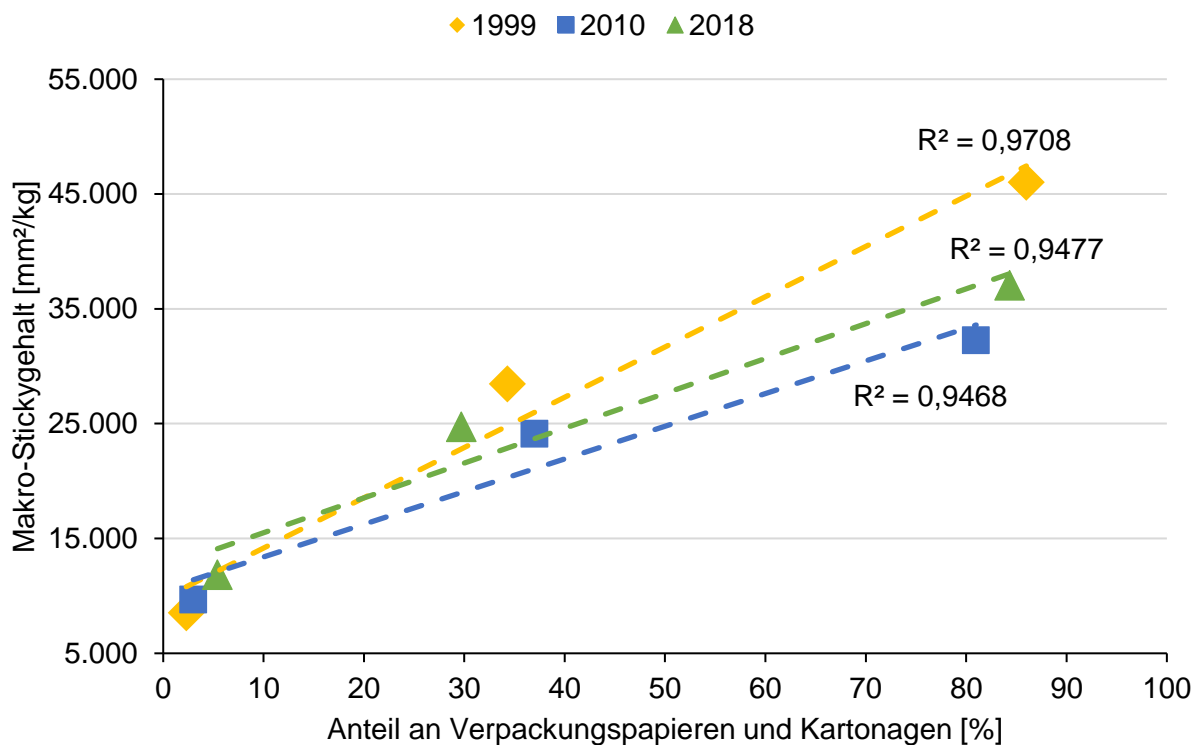


Abb. 26: Korrelation zwischen dem Makro-Stickygehalt und dem Anteil an Verpackungspapieren und Kartonagen der untersuchten Altpapiersorten von 1999 bis 2018

4.3.6. Mikro-Stickygehalt

Zum ersten Mal wurde in der aktuellen Studie der Mikro-Stickygehalt bestimmt. Hierfür kam ein Durchflusszytometer zum Einsatz, das in der Lage ist, die Anzahl hydrophober Partikel, die mit einem UV-Farbstoff markiert wurden, in einem Filtrat zu bestimmen. Auf diese Weise lassen sich Vergleiche zwischen den untersuchten Papiersorten anstellen.

Abb. 27 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Aufgetragen ist die Anzahl der hydrophoben Partikel über der Partikelgröße. Auffällig ist, dass sich die dargestellten Kurven der Sorten 1.02, 1.04 und 3.10 stark ähneln. Die Kurve der Sorte 1.11 weicht hingegen deutlich von diesem Muster ab. Summiert man die Zahl der Partikel für die jeweilige Sorte, so erhält man für 1.02, 1.04 und 3.10 in etwa die gleichen Werte, wohingegen die Anzahl für die Sorte 1.11 um ein Drittel höher liegt. In anderen Worten bedeutet das, dass die Sorte 1.11 mehr, aber dafür kleinere Mikro-Stickys enthält. Eine Ursache hierfür könnten die Selbstklebeflächen z. B. von Briefumschlägen sein. Die hier eingesetzten Dispersionsklebstoffe liefern eher viele kleine Stickys, während die im Verpackungsbereich häufig eingesetzten Hotmelt-Klebstoffe eher größere Stickys verursachen.

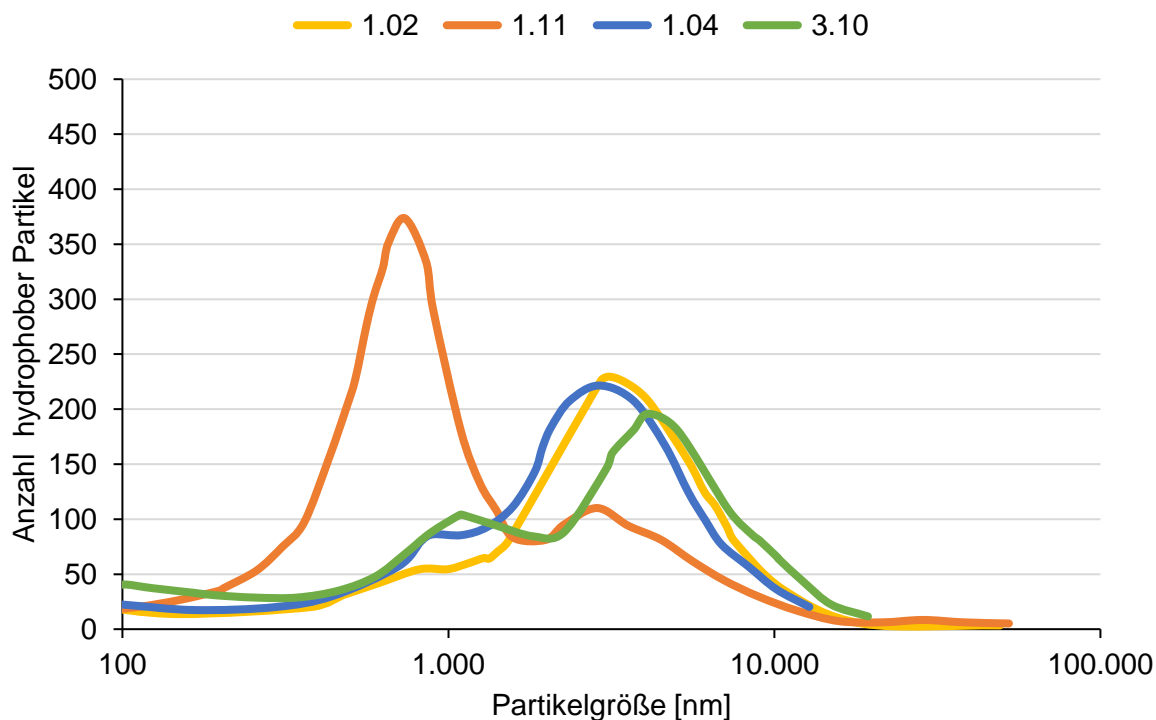


Abb. 27: Größenverteilung der hydrophoben Partikel für die untersuchten Papiersorten

4.3.7. Schmutzpunkte

Bei Schmutzpunkten handelt es sich um sichtbare optische Inhomogenitäten im Papier mit farbllichem Kontrast zum Gesamtblatt und einem Durchmesser von mehr als 50 μm . Diese können beispielsweise durch beim Deinking nicht entfernte Druckfarbenreste oder bei der Sortierung nicht aussortierte papierfremde Bestandteile hervorgerufen werden. Sie stören das optische Gesamtbild des Papiers und sind somit in erster Linie für grafische Papiere ein kritisches Qualitätsmerkmal.

Abb. 28 zeigt die Entwicklung der Schmutzpunktfäche der untersuchten Sorten seit 1996. Die Sorte 1.11 wird in dieser Untersuchung unterschieden nach deinktem Stoff (DP) und undeinktem Stoff (UP). Der deinkte Stoff von 1.11 weist mit einer durchschnittlichen Schmutzpunktfäche von 680 mm^2/m^2 den geringsten Wert auf. Dies ist darin begründet, dass durch das Deinking bereits die meisten Druckfarbenpartikel und sonstige Verunreinigungen entfernt wurden. Der undeinkte Stoff von 1.11 (1.300 mm^2/m^2) liegt in etwa auf dem Niveau der Sorte 1.04 (1.200 mm^2/m^2). 1.02 hat mit 1.600 mm^2/m^2 die höchste Schmutzpunktfäche dieser drei Sorten. Generell liegt das Niveau der gemessenen Werte jedoch deutlich unter den Werten von 2010. Der Rückgang liegt bei allen dargestellten Sorten bei etwa 33 %.

Die gemessenen Werte für den deinkten und undeinkten Stoff der Sorte 3.10 ist in Abb. 28 nicht dargestellt. Dies liegt an den extrem hohen Werten, die die Darstellung zusammen mit den Werten der anderen Sorten nicht zugelassen haben. Stattdessen zeigt Abb. 29 einen Boxplot der gemessenen Werte der Sorte 3.10. Für den undeinkten Stoff von 3.10 ergab sich im Mittel eine Schmutzpunktfäche von 11.500 mm^2/m^2 und einer Standardabweichung unter den Einzelproben

von 4.400 mm²/m². Für den deinkten Stoff lag der Mittelwert bei 4300 mm²/m² und die Standardabweichung bei 3.700 mm²/m². Neben den hohen Werten fällt insbesondere auf, dass die Streubreite der gemessenen Werte sehr groß ist. Dies bedeutet, dass, abhängig von der Lieferung, in der Produktion einer Papierfabrik sehr große Schwankungen in Bezug auf die Schmutzpunkte möglich sind.

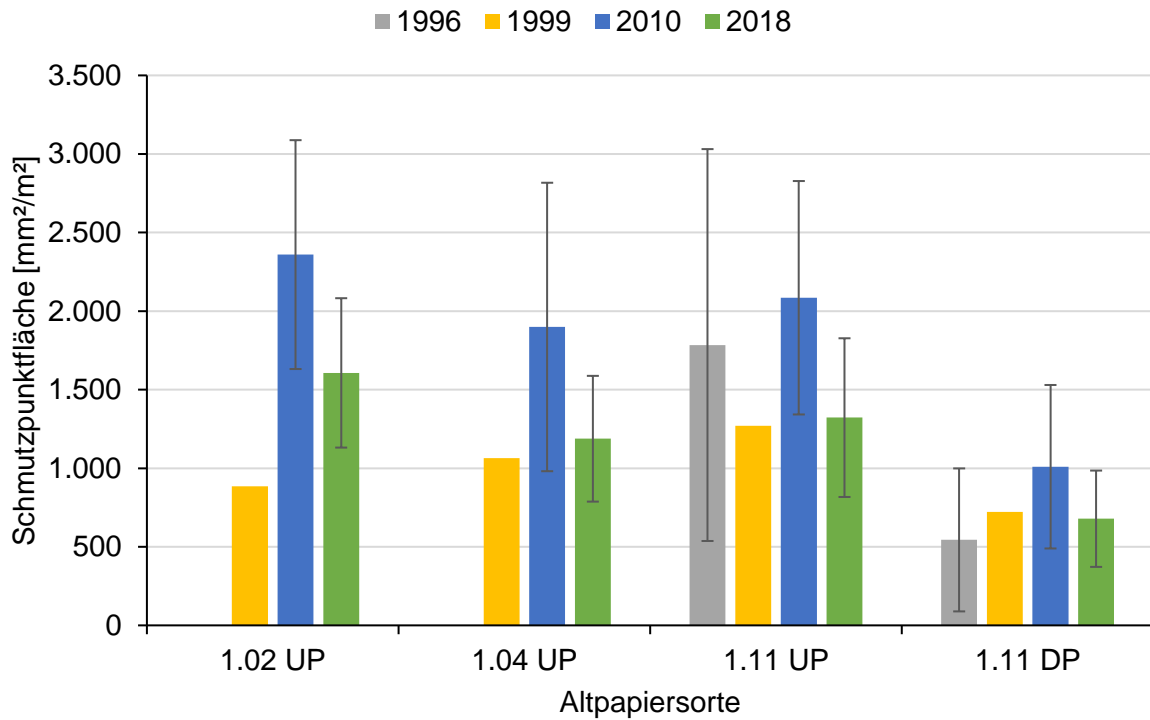


Abb. 28: Schmutzpunkte der untersuchten Sorten von 1996 bis 2018

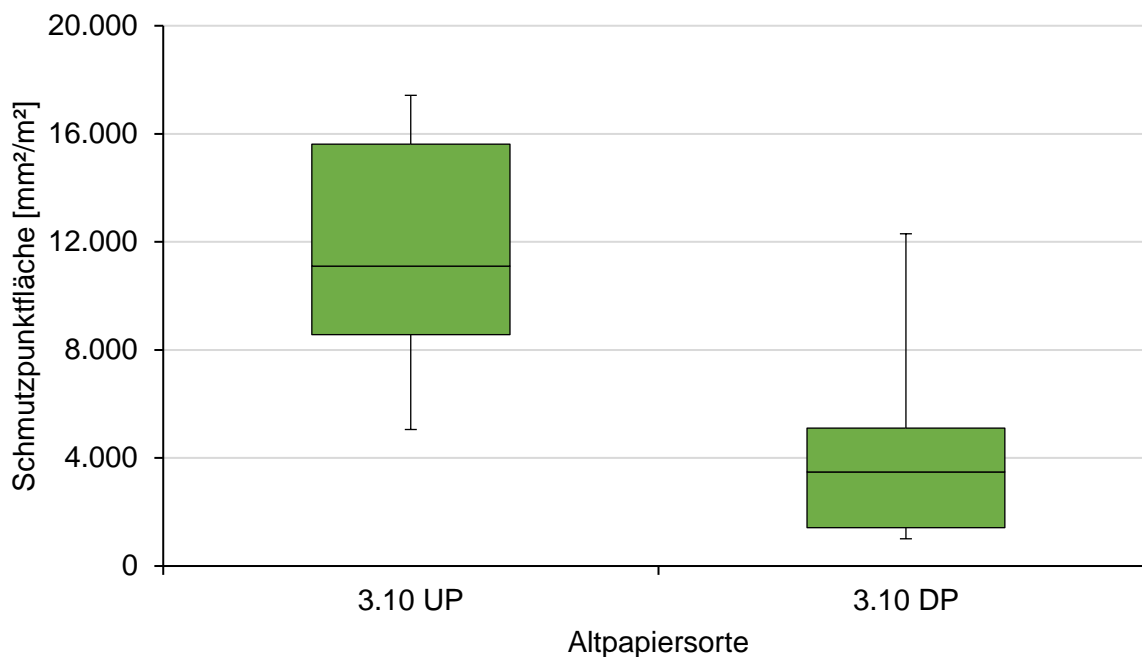


Abb. 29: Boxplot-Darstellung der Schmutzpunkte der Sorte 3.10 bei der Studie 2018

4.4. Optische Eigenschaften

4.4.1. Weißgrad (R_{457})

Betrachtet man den Weißgrad der untersuchten Altpapiersorten in Abb. 30, fällt auf, dass er bei den vergangenen Untersuchungen für die Deinkingware sowohl im deinkten als auch im undeinkten Fall konstant geblieben ist. In der aktuellen Untersuchung hat sich für den deinkten Stoff ein Weißgrad von 57 % und für den nicht deinkten Stoff ein Weißgrad von 45 % ergeben. Bei der Sorte 1.02 konnte im Vergleich zu 2010 ein leichter Anstieg des Weißgrads auf 38 % auf 40 % festgestellt werden. Dies ist vermutlich auf den Anstieg an grafischen Papieren in dieser Sorte zurückzuführen. Der Weißgrad der Sorte 1.04 sank zum ersten Mal seit Beginn der Studien 1984 unter den Wert von 30 %. Der Weißgrad der Sorte 3.10 liegt deutlich über den Werten der anderen untersuchten Sorten. Für den undeinkten Stoff wurde ein Weißgrad von 75 % gemessen, für den deinkten Stoff von 83 %.

Vergleicht man die Weißgrade des undeinkten Stoffs mit den Werten des deinkten Stoffs, lässt sich daraus eine Weißgradsteigerung durch Flotationsdeinking bestimmen. Diese Weißgradsteigerung liegt für die Sorte 1.11 seit 1999 sehr stabil bei etwas über 11 %-Punkten. Bei der Sorte 3.10 ließ sich der Weißgrad durch Flotationsdeinking um 8 %-Punkte steigern.

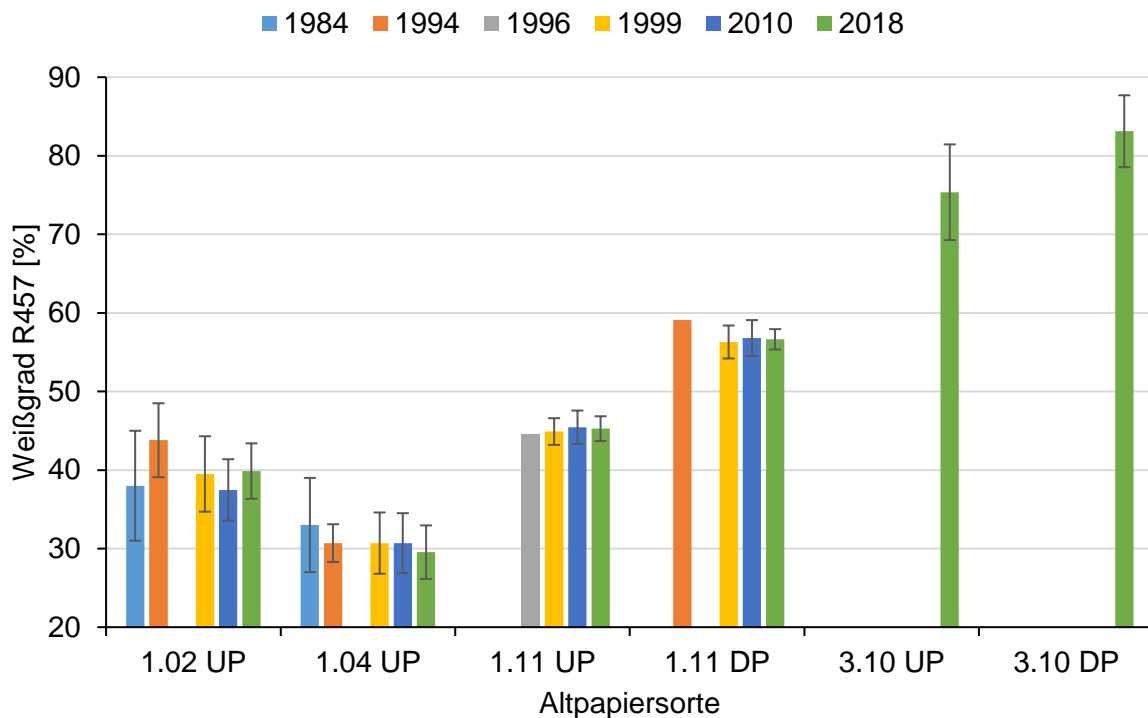


Abb. 30: Weißgrad der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

4.4.2. Hellbezugswert (Y)

Der Hellbezugswert ist eine Maßzahl die bewertet, wie hell eine Körperfarbe im Vergleich zu einer ideal weißen, nach Stärke und Richtung und Qualität ebenso beleuchteten Fläche ist. Betrachtet man die Deinkingware 1.11, ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Weißgrad (Abb. 31). Der Hellbezugswert hat sich seit der letzten Untersuchung 2010 nicht geändert und liegt für den undeinkten Stoff weiterhin bei 49 und für den deinkten Stoff bei 63. Wie nicht anders zu erwarten war, liegt der Hellbezugswert der Sorte 3.10 deutlich über dem Niveau der anderen Sorten. Beim deinkten Stoff wird hier ein Wert von 84 erreicht, beim undeinkten Stoff 76. Bei den Sorten 1.02 und 1.04 konnte im Rahmen der Messgenauigkeit keine Veränderung festgestellt werden.

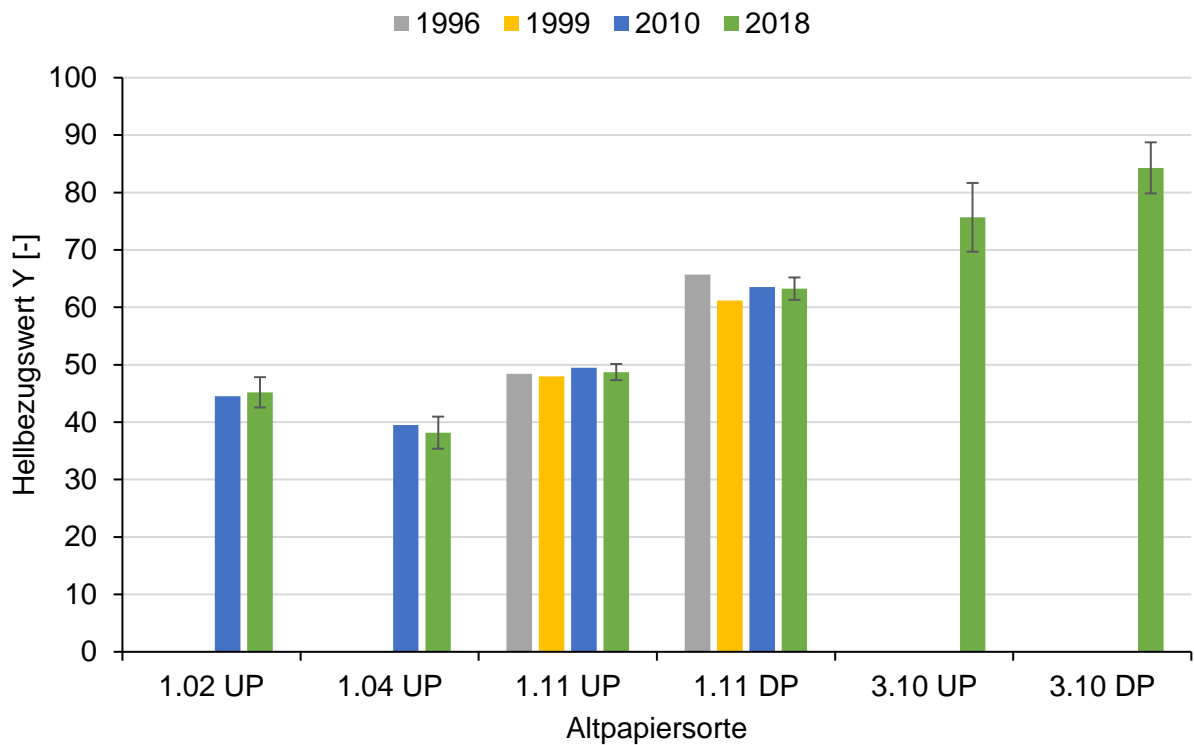


Abb. 31: Hellbezugswert der untersuchten Sorten von 1996 bis 2018

4.4.3. L*-, a*-, b*-Werte

Der CIELAB-Farbraum ist ein Farbraum. Es drückt die Farbe als drei Werte aus: L* für die Helligkeit von schwarz (0) bis weiß (100), a* von grün (-) bis rot (+) und b* von blau (-) bis gelb (+). CIELAB wurde so konzipiert, dass die gleiche numerische Änderung dieser Werte ungefähr

der gleichen Menge an visuell wahrgenommener Veränderung entspricht.

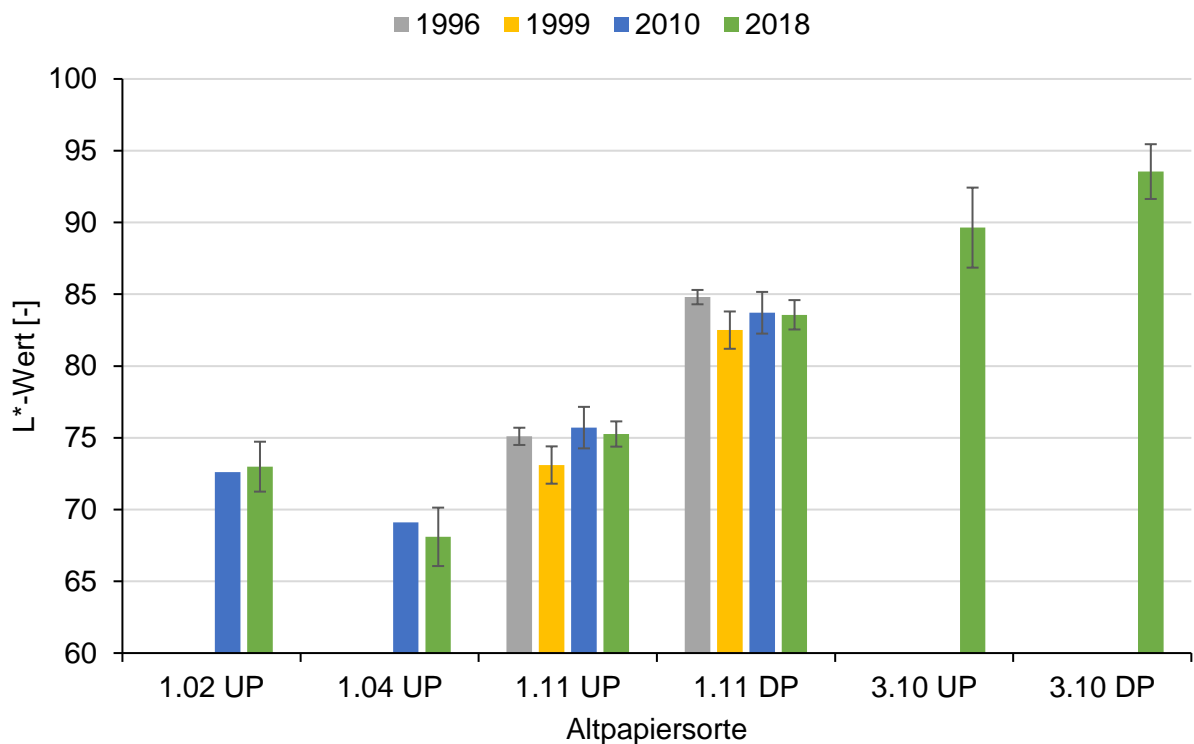


Abb. 32, Abb. 33 und Abb. 34 zeigen die Entwicklung der L*a*b*-Werte seit 1996.

L* zeigt, als weiteres Maß für die Helligkeit, eine sehr ähnliche Entwicklung wie der Weißgrad R457 und der Hellbezugswert. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnte auch hier keine Änderung seit 2010 festgestellt werden.

Auch a* zeigt keine signifikante Veränderung. Legt man beispielweise die Grenzwerte von der Bewertung der Deinkbarkeit von Druckprodukten zugrunde, wären Werte von a* zwischen -3 und 2 akzeptabel. Im Ausnahme der Sorte 1.04 sind alle untersuchen Sorten deutlich innerhalb dieser Grenzen. Für die Sorte 1.04 spielen die optischen Eigenschaften aber auch keine entscheidende Rolle.

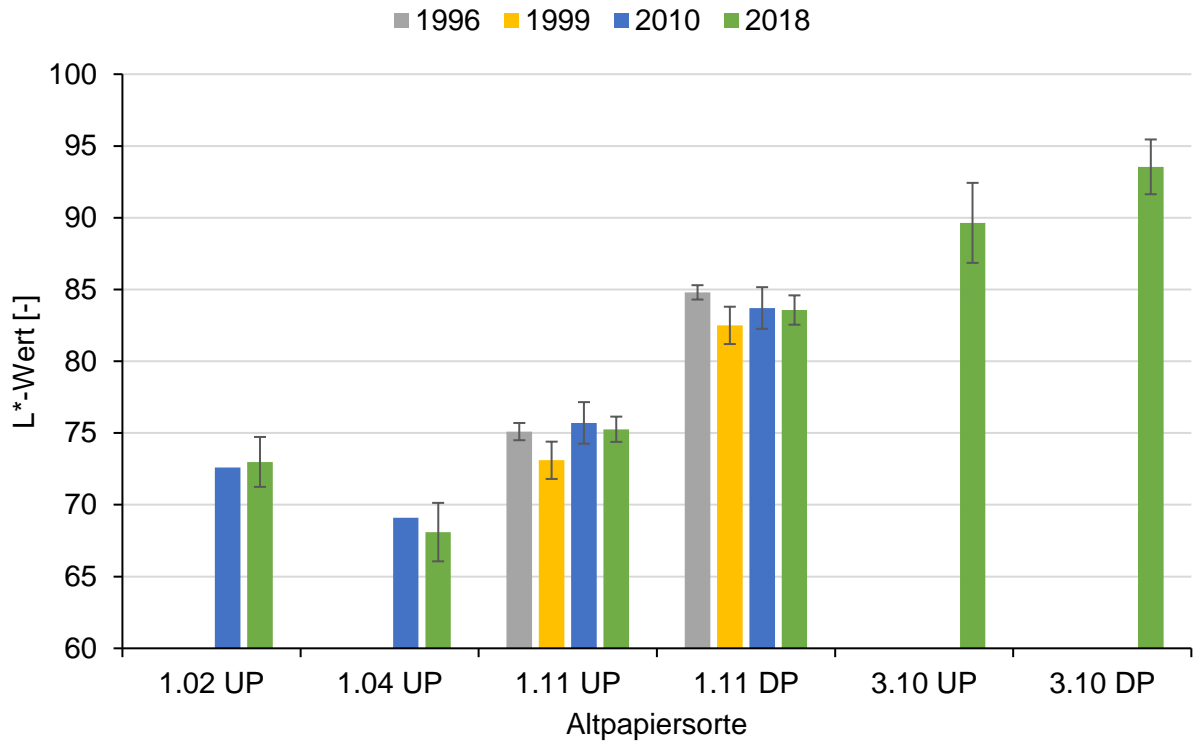


Abb. 32: L*-Werte der untersuchten Sorten von 1996 bis 2018

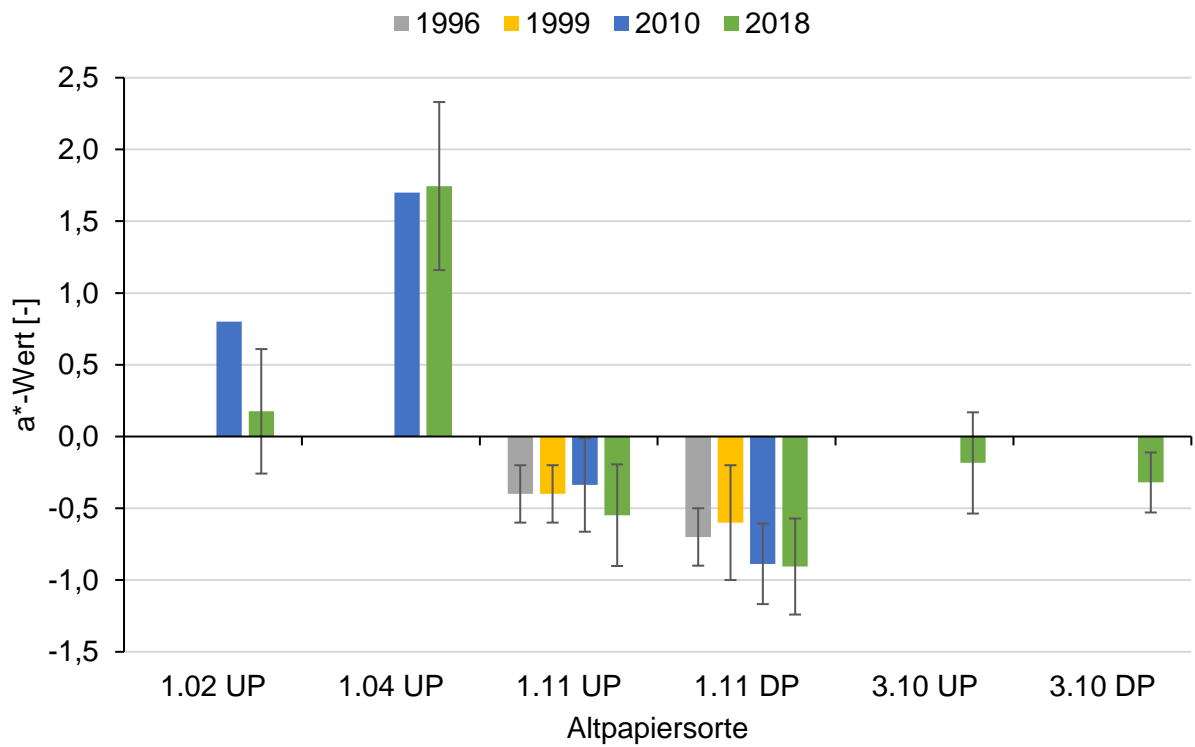


Abb. 33: a*-Werte der untersuchten Sorten von 1996 bis 2018

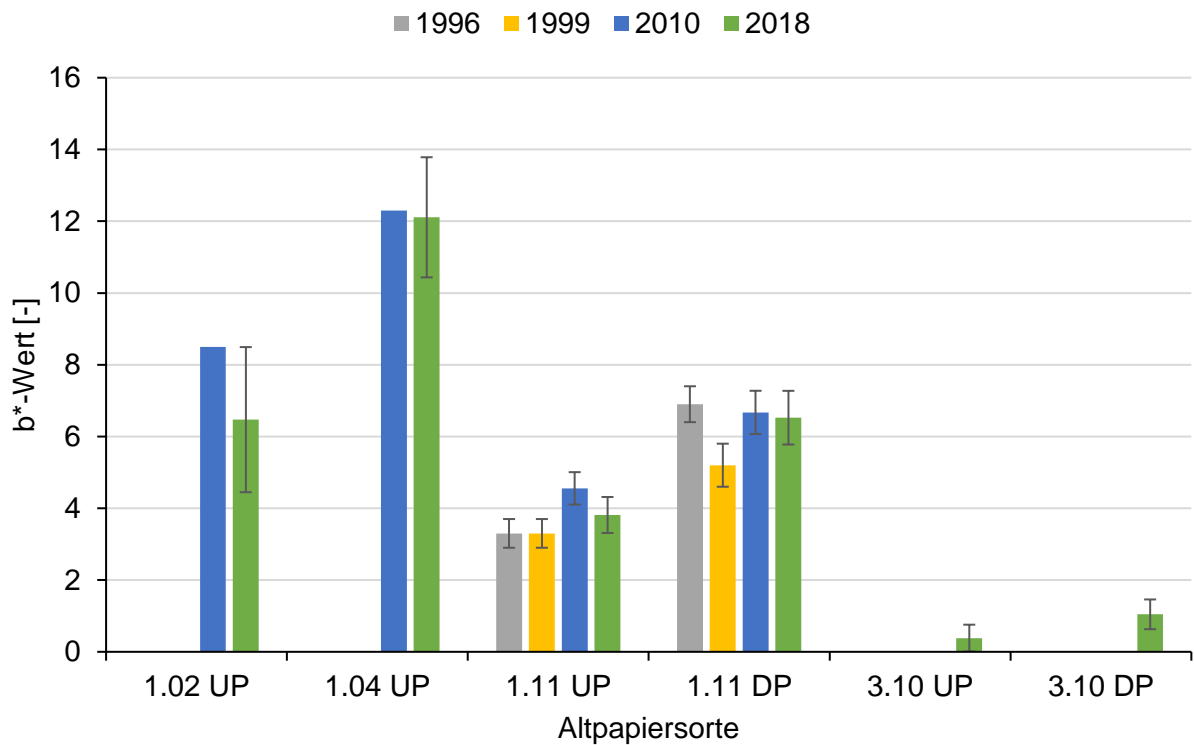


Abb. 34: b*-Werte der untersuchten Sorten von 1996 bis 2018

4.4.4. ERIC

Der ERIC-Wert korreliert mit der Gesamtmenge der in der Fasersuspension vorhandenen Restdruckfarbe. Die Werte von 2010 und die aktuellen Messwerte sind in Abb. 35 dargestellt. Dieser Werte wurde in der Untersuchung 2010 zum ersten Mal aufgenommen. Mit 214 ppm liegt der gemessene Wert von 2018 für den deinkten Stoff der Sorte 1.11 nur 2 ppm über dem Wert von 2010. Mit 692 ppm liegt der Wert für den undeinkten Stoff nur unwesentlich höher als der gemessene Wert von 2010.

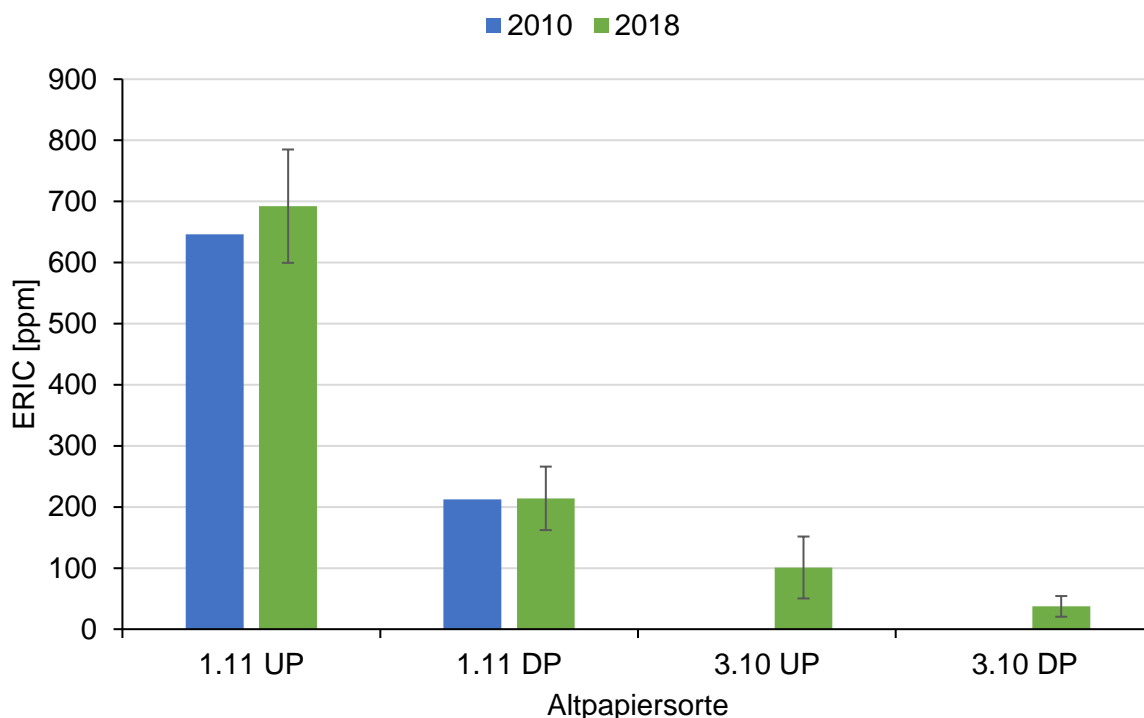


Abb. 35: ERIC-Werte der Sorten 1.11 und 3.10 von 2010 bis 2018

4.5. Festigkeitseigenschaften

4.5.1. Zugfestigkeit (Reißlänge), Weiterreißarbeit und Berstfestigkeit

Für die Untersuchung der Festigkeitseigenschaften wurden Laborblätter mit einem Flächengewicht von 80 g/m² gebildet.

Grundsätzlich lässt sich in Abb. 36 erkennen, dass mit steigender Menge an Verpackungspapieren in den Sorten eine Zunahme der Reißlänge zu beobachten ist. Dies ist in erster Linie auf Kraftfasern aus den Verpackungsprodukten zurückzuführen. Während sich die Reißlänge bei der Sorte 1.02 nicht signifikant geändert hat, konnte für die Sorten 1.04 und 1.11 ein leichter Rückgang der Reißlänge verzeichnet werden. Seit Beginn der Untersuchungen hatte sich hier bisher der Trend abgezeichnet, dass die Werte für die Reißlänge stetig steigen. Hier bereits von einer Trendwende zu sprechen, wäre aber sicherlich zu früh.

Abb. 37 zeigt die Entwicklung der Weiterreißarbeit. Hohe Weiterreißarbeiten lassen in der Regel auf niedrige Aschegehalte und eine hohe mittlere Faserlänge schließen. Dies erklärt das, im Vergleich mit den anderen untersuchten Sorten, schlechte Abschneiden der Sorte 3.10, die in zum einen einen sehr hohen Aschegehalt aufweist und zum anderen tendenziell eher kurze Fasern besitzt. Während bei der Deinkingware 1.11 die Weiterreißarbeit eher etwas zurückging, stieg der Wert für die Verpackungspapiere der Sorte 1.04. In geringerem Maße trifft dies auch auf die Sorte 1.02 zu.

Für die Berstfestigkeit ist in Abb. 38 für alle untersuchten Sorten seit 1999 ein leichter Trend zu steigenden Werten zu beobachten. Grundsätzlich ist auch hier eine Abhängigkeit zur Menge an Verpackungspapieren zu erkennen.

Generell lässt sich sagen, dass trotz deutlich besser geschlossenen Altpapierkreisläufen und damit verbunden häufigeren Recyclingzügen der einzelnen Fasern kein signifikanter Abfall der Festigkeiten zu beobachten ist.

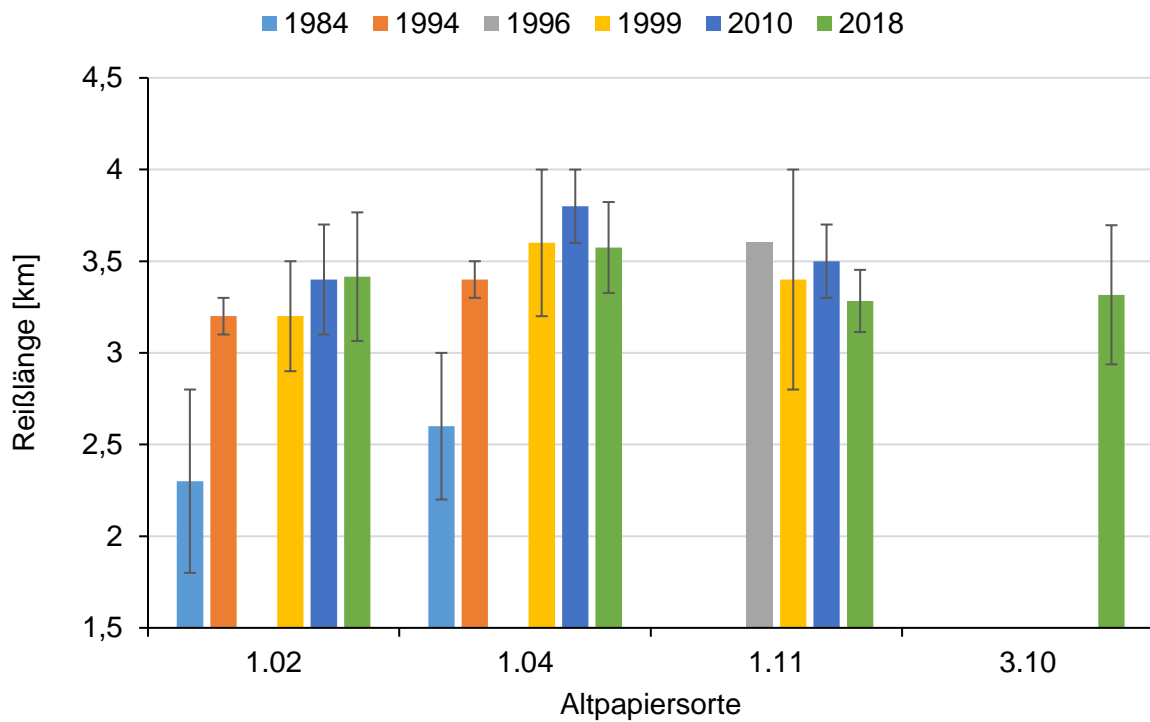


Abb. 36: Reißlänge der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

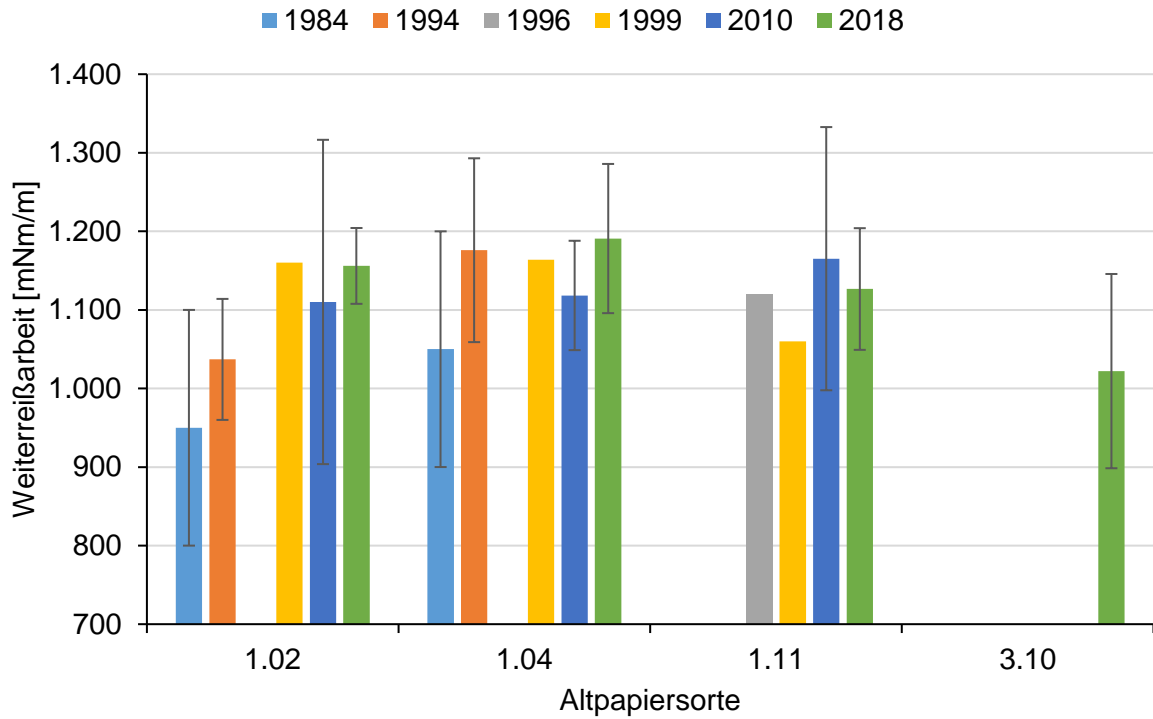


Abb. 37: Weiterreißarbeit der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

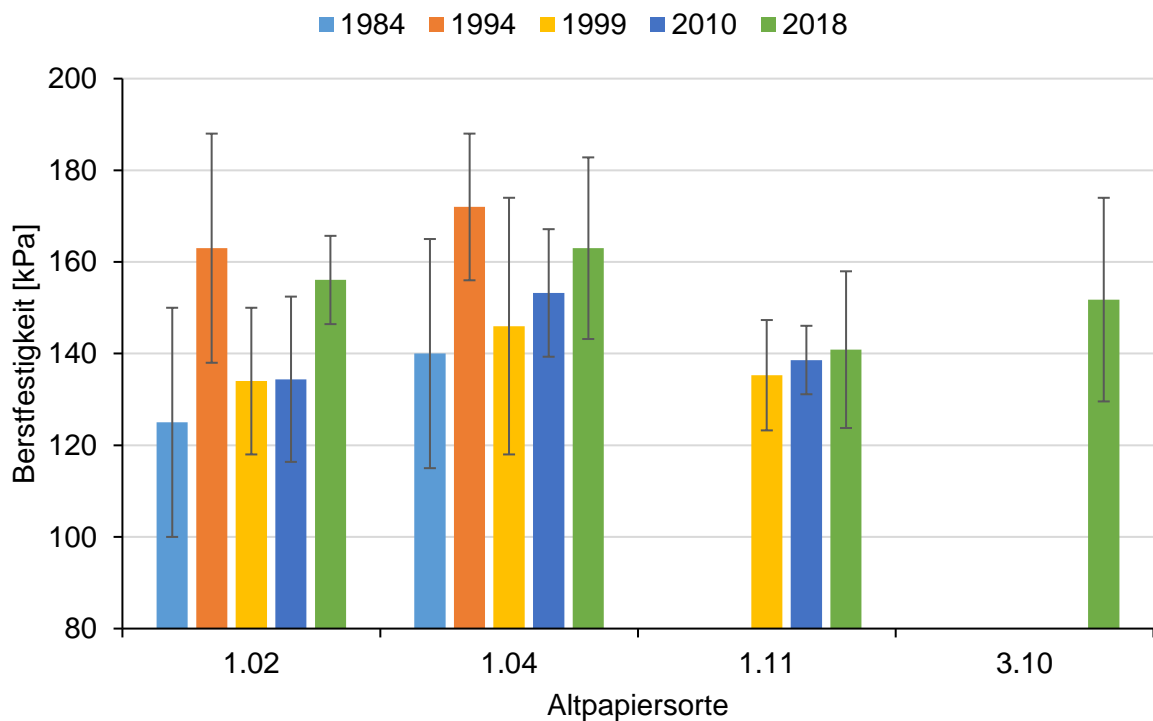


Abb. 38: Berstfestigkeit der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

4.5.2. Ring-, Streifen- und Flachstauchwiderstand

Ring- (RCT), Streifen- (SCT) und Flachstauchwiderstand (CMT) sind Eigenschaften, die die Eignung von Papieren Wellpappenherstellung beschreiben. Die Durchführung dieser Untersuchungen an grafischen Sorten würde keinen Sinn machen, weshalb diese Parameter nur bei den Sorten 1.02 und 1.04 durchgeführt wurden.

Bereits 2010 konnte bei der Sorte 1.04 ein Rückgang des RCT im Vergleich zur vorangegangenen Studie festgestellt werden (Abb. 39). Auch bei der neusten Untersuchung wurde ein weiterer Rückgang gemessen. Auch bei der Sorte 1.02 sank der Wert im Vergleich zu 2010.

Keine Veränderung gab es beim SCT seit 2010, wie Abb. 40 zeigt. Sowohl bei der Sorte 1.02 als auch bei der Sorte 1.04 liegen die gemessenen Werte genau auf dem Niveau von 2010.

Beim CMT sind tendenziell steigende Werte zu beobachten. Bei der Sorte 1.02 war der Anstieg noch etwas deutlicher als bei der Sorte 1.04, wie Abb. 41 zu entnehmen ist.

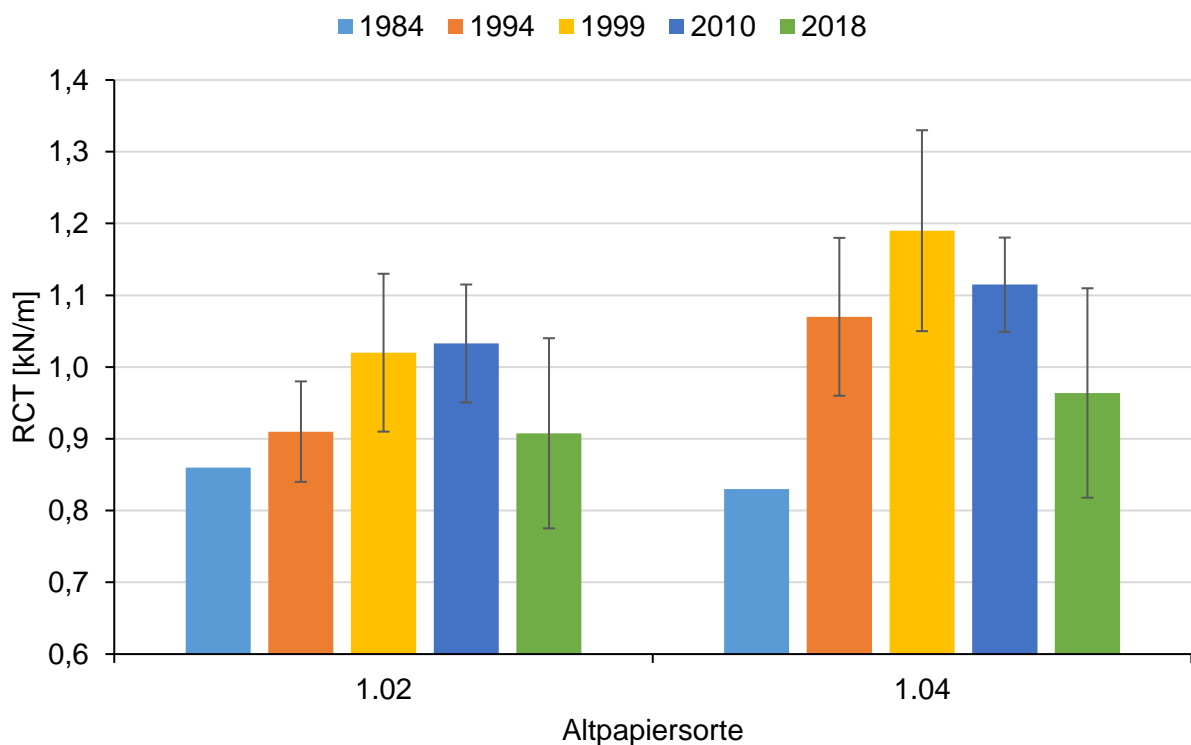


Abb. 39: Ringstauchwiderstand (RCT) der Sorten 1.02 und 1.04 von 1984 bis 2018

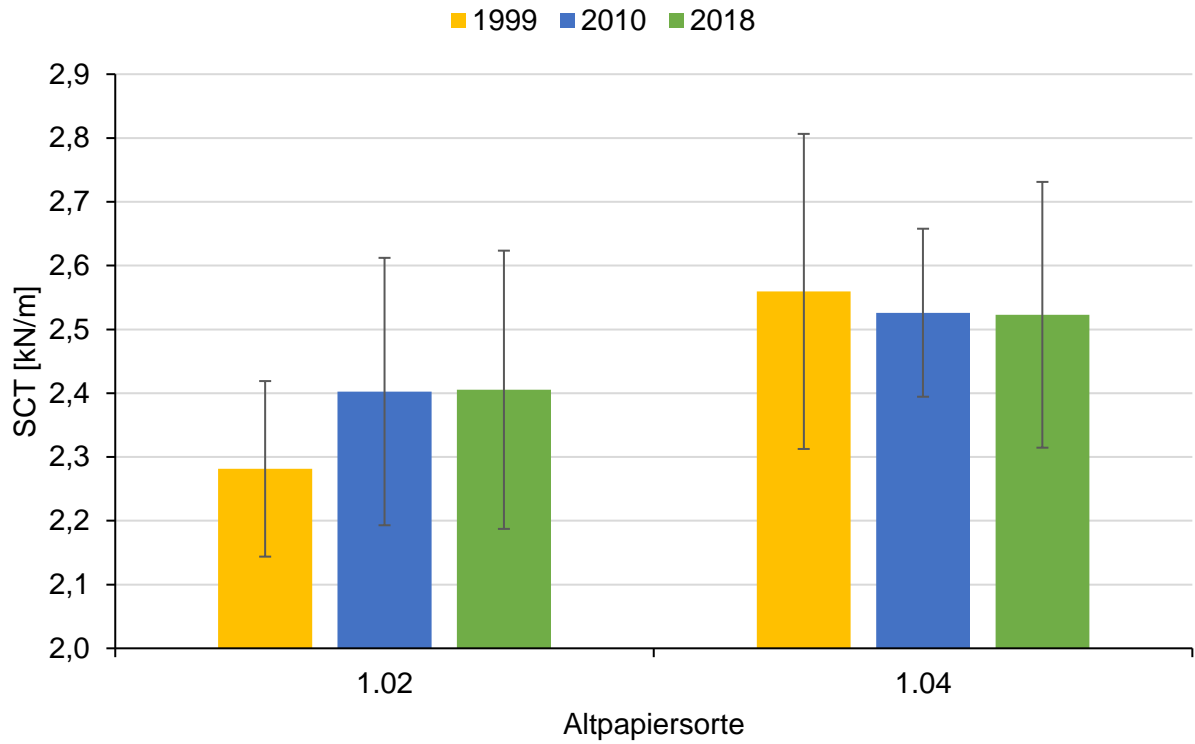


Abb. 40: Streifenstauchwiderstand (SCT) der Sorten 1.02 und 1.04 von 1984 bis 2018

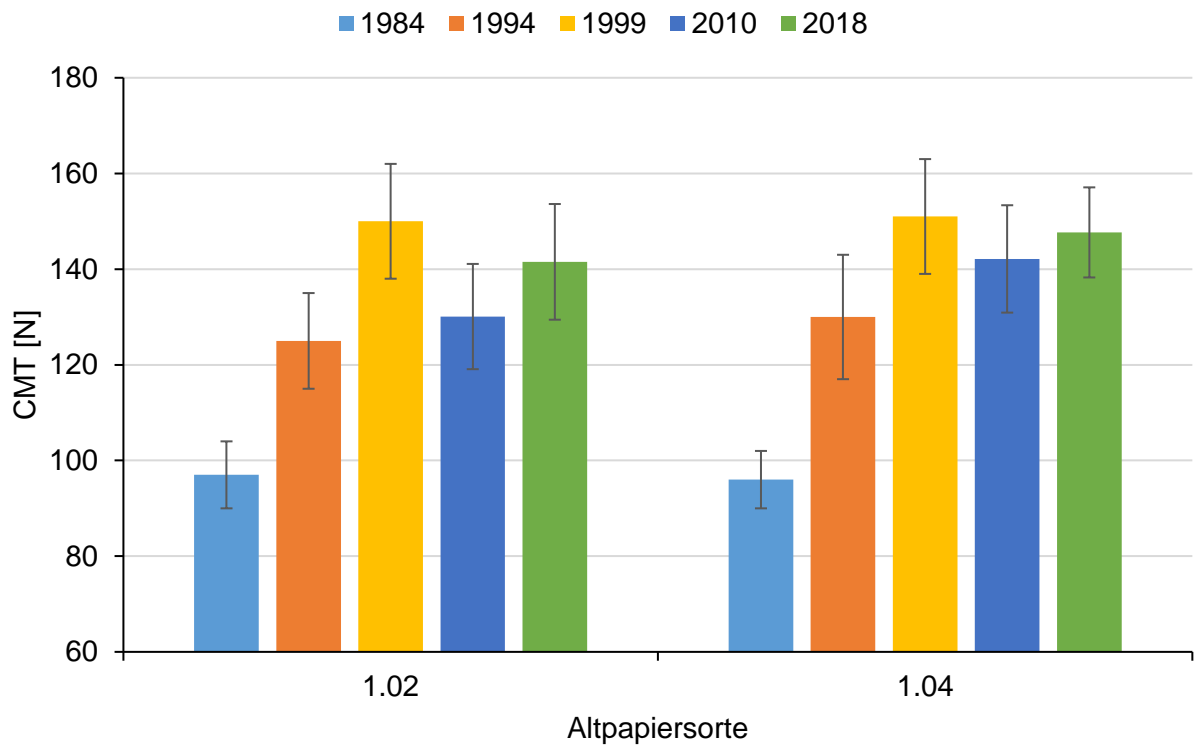


Abb. 41: Flachstauchwiderstand (CMT) der Sorten 1.02 und 1.04 von 1984 bis 2018

4.6. Chemische Inhaltsstoffe

4.6.1. Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) ist ein Indikator für die Menge an Sauerstoff, die durch Reaktionen in einer gemessenen Lösung verbraucht werden kann. Es wird üblicherweise in der Masse des verbrauchten Sauerstoffs über dem Volumen der Lösung ausgedrückt, die in SI-Einheiten Milligramm pro Liter (mg/L) beträgt. Der CSB-Test gibt Aufschluss über die Menge der oxidierbaren organischen Stoffe in der eingesetzten Faserquelle. In Papierfabriken ist die CSB-Belastung im Kreislaufwasser von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig, wie beispielsweise den eingesetzten Rohstoffen, dem Grad der Kreislaufschließung und dem Frischwassereinsatz. Relevante organische Substanzen sind lösliche Bestandteile aus dem Holz, wie z. B. Abbauprodukte der Zellulose und der Hemicellulose oder chemische Additive wie Stärke oder Leimungsmittel.

Eigentlich war eine Messung des aktuellen CSB-Gehalts für alle vier untersuchten Altpapiersorten vorgesehen. Eine Fehlinterpretation der Aufzeichnungen der letzten Studie aus dem Jahre 2010 führte jedoch zur Zugabe der Deinkingchemikalien bei den grafischen Sorten 1.11 und 3.10 zum falschen Zeitpunkt, wodurch die Ergebnisse für diese Sorten erheblich verfälscht und damit unbrauchbar wurden. Aus diesem Grund kann für diese beiden Sorten kein aktueller Messwert für den CSB-Gehalt angegeben werden.

Bei der Sorte 1.04 kam es im Mittel zu einer Steigerung des CSB-Gehalts um mehr als 25 %, die vermutlich insbesondere auf den gestiegenen Einsatz von Stärke zur Festigkeitssteigerung in Verpackungspapieren zurückzuführen ist. Der mittlere CSB-Wert der Sorte 1.02 sank seit der letzten Untersuchung um etwa 25 %.

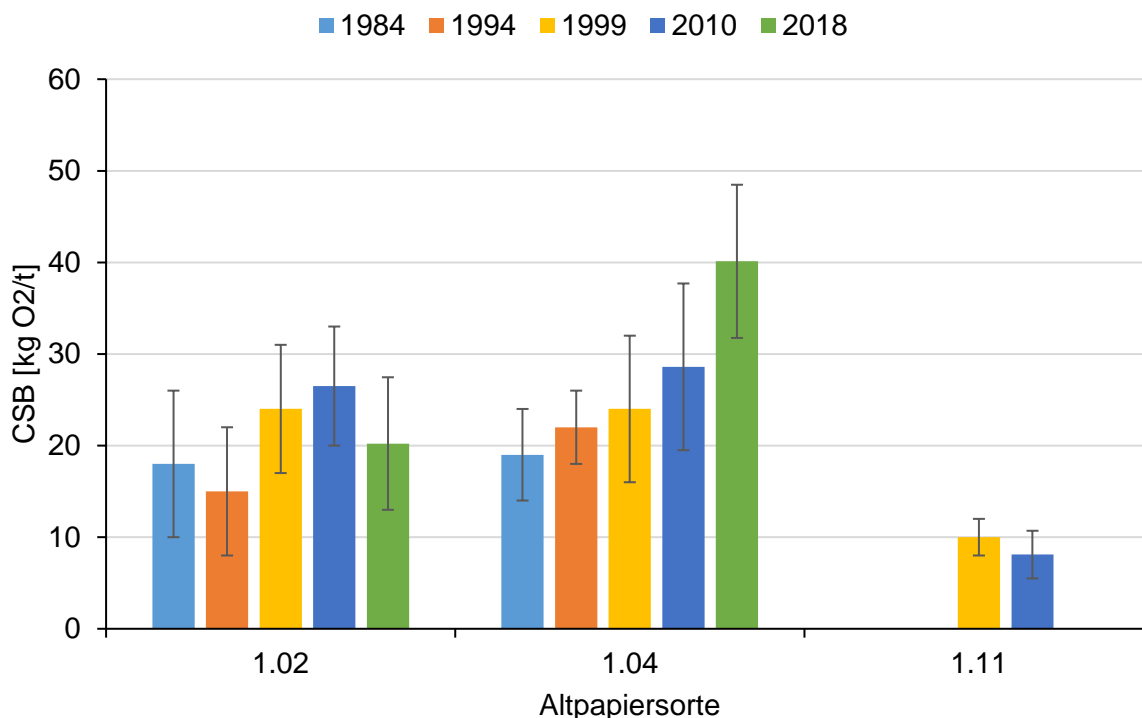


Abb. 42: Chemischer Sauerstoffbedarf der untersuchten Sorten von 1984 bis 2018

4.6.2. Organische Halogenverbindungen (OX)

OX ist die international übliche Abkürzung für organische Halogenverbindungen (X steht für Halogen). Die Substanzen dieser Stoffklasse gelten als überwiegend nicht natürlichen Ursprungs und als schwer abbaubar. Zwischen OX-Konzentration und Toxizität lässt sich bei der Untersuchung von Abwässern keine Korrelation erkennen. Wegen der vielfältigen bedenklichen Eigenschaften dieser Stoffgruppe wird eine möglichst weitgehende Vermeidung des Eintrags in die Umwelt angestrebt. Eine Hauptquelle halogenorganischer Verbindungen war zunächst die Zellstoffbleiche mit Chlor und Chlorverbindungen. Der Wechsel auf Sauerstoff, Peroxid oder Ozon führte zu einer erheblichen Verringerung des Anteils halogenorganischer Verbindungen. Als weitere Quelle sind neben gebleichten Zellstoffen chemische Additive wie z. B. Nassfestmittel, Schleimbekämpfungsmittel und Reinigungsmittel zu nennen, deren Wirkstoffe oder Begleitstoffe halogenorganische Verbindungen enthalten können. Die Höhe der Belastung ist von der Einsatzmenge abhängig. Die Verteilung der Belastung auf Abwasser, Produkt und Reststoff hängt von der Additivretention ab. Die Zuliefererindustrie hat seit vielen Jahren Maßnahmen ergriffen, um die halogenorganische Belastung zu senken.

Für die Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 gab es seit der letzten Untersuchung 2010 keine signifikanten Veränderungen. Auffällig ist lediglich die enorme Streubreite bei den Sorten 1.02 und 1.04. Für die Sorte 3.10 war eine Messung der organischen Halogenverbindungen nicht möglich, da aufgrund von starker Rußbildung das Messgerät bei jeder Messung verstopfte.

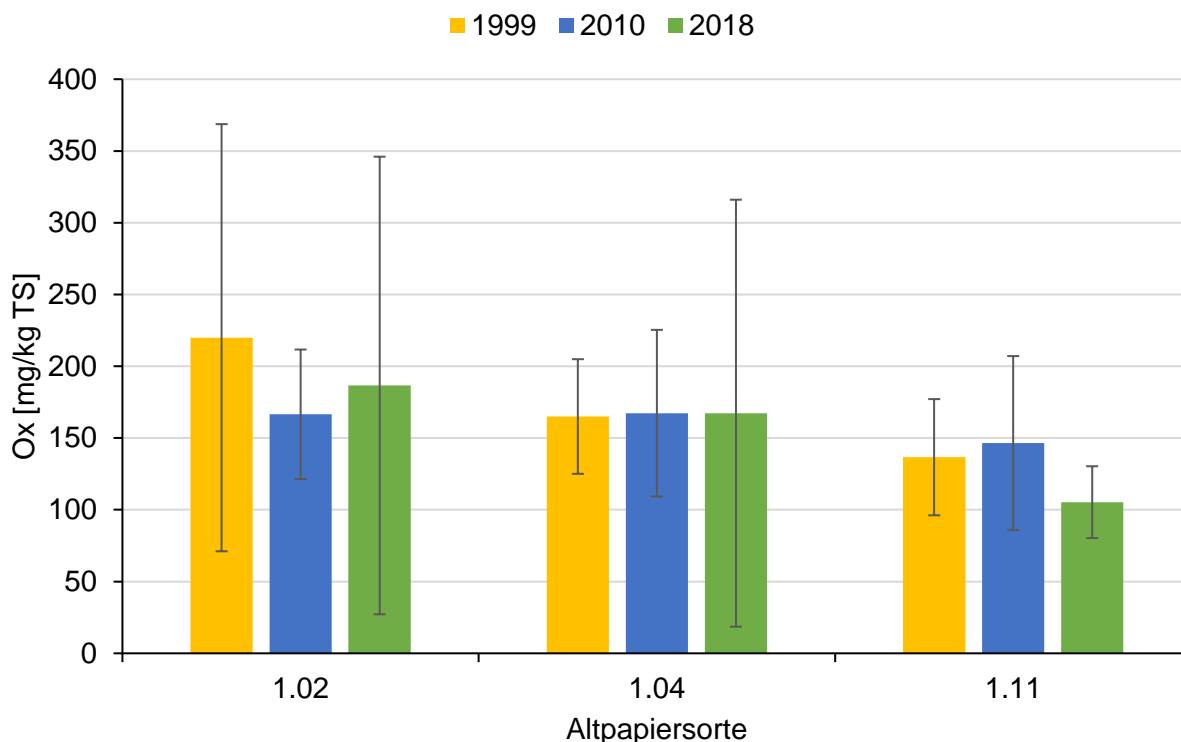


Abb. 43: Organische Halogenverbindungen der untersuchten Sorten von 1999 bis 2018

4.6.3. Pentachlorphenol (PCP)

PCP gehört zur Gruppe der Chlorphenole. PCP hat fungizide und bakterizide Eigenschaften und ist deshalb ein starkes Gift für Bakterien, Algen, Pilze, Hefen und Insekten, insbesondere für Holzschädlinge. PCP-Verbindungen wurden daher in großem Umfang als Holzschutzmittel sowohl in der Forstwirtschaft, im Baubereich als auch in der Möbelindustrie angewandt. Aufgrund seiner bakteriziden Eigenschaften war PCP eine äußerst wirkungsvolle Substanz zur Schleimbekämpfung im Papierherstellungsprozess. Andererseits gehen von PCP schwerwiegende toxikologische und ökotoxikologische Wirkungen aus. Dies veranlasste die deutsche Papierindustrie, bereits 1971 im Rahmen einer freiwilligen Selbstverpflichtung auf den Einsatz von PCP als Schleimverhinderungsmittel zu verzichten. Im Jahr 1989 wurden die Produktion und der Einsatz von PCP in Deutschland nach Inkrafttreten des Verwendungsverbots eingestellt. Nach dem Produktionsstopp in Deutschland stieg die PCP-Produktion in anderen europäischen Staaten zunächst an, so dass derartig behandelte Papiere über Importe von Altpapier und verpackt gelieferter Güter weiterhin in den nationalen Altpapierkreislauf eintreten konnten. In den 90er Jahren wurden ein neuer PCP-Grenzwert sowie Nachweismethode und Nachweisgrenze von Toxikologen in der Expertenkommission des Europarates diskutiert. Seitdem ein Grenzwert als Reinheitsanforderung für Papiere mit Lebensmittelkontakt vom Europarat verabschiedet wurde, ist der Gehalt an PCP in Papieren deutlich gesunken.

Bei den Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 gab es seit der letzten Untersuchung 2010 keine signifikanten Veränderungen (Abb. 44). 1.02 weist mit 52 µg/kg den höchsten Gehalt auf, während bei der Sorte 1.11 mit 15 µg/kg der geringste Gehalt dieser drei Sorten gemessen wurde. Für die Sorte

3.10 lag der PCP-Gehalt in allen untersuchten Proben unterhalb der Nachweisgrenzen von 5 µg/kg TS.

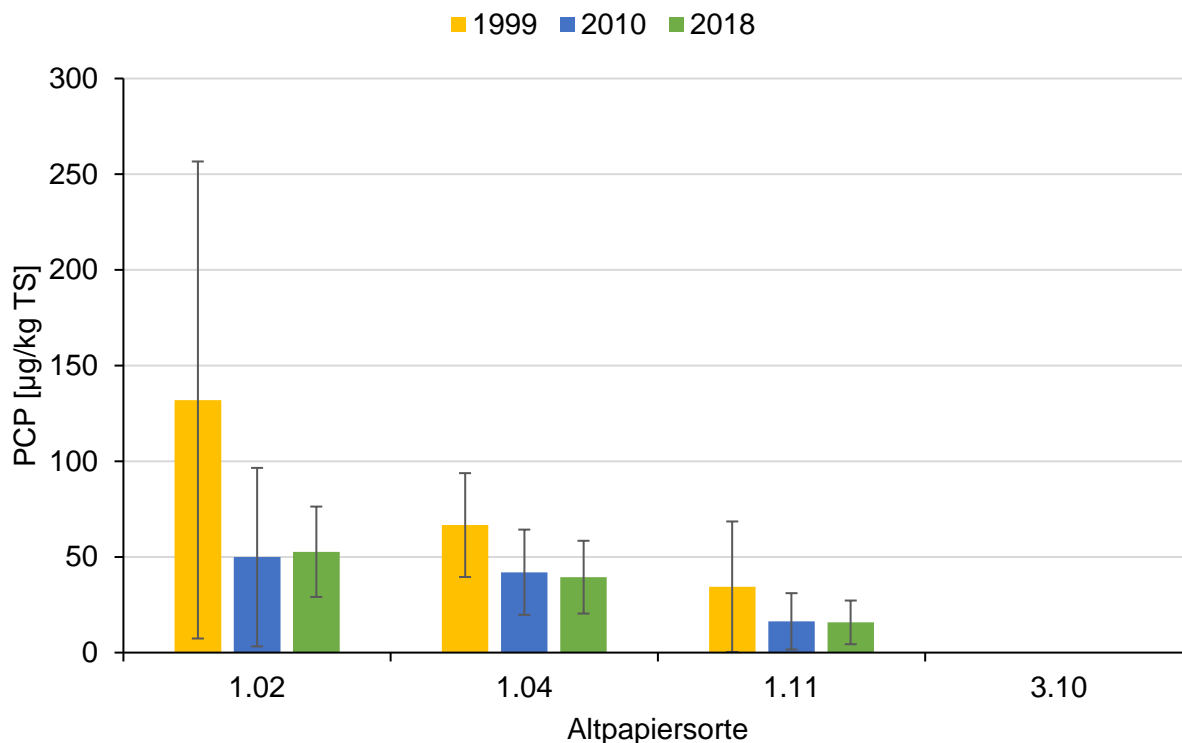


Abb. 44: Pentachlorphenol im Methanolextrakt der untersuchten Sorten von 1999 bis 2018

4.6.4. Schwermetalle

Für den Einsatz von Papieren in bestimmten Anwendungsbereichen, wie z. B. im Lebensmittelkontakt, ist die Einhaltung von Grenzwerten für den Gehalt an Schwermetallen vorgeschrieben. Die Papiere müssen daher der Empfehlung XXXVI „Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt“ des Bundesinstitutes für Risikobewertung entsprechen. Auch die europäische Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle macht Vorgaben zur zulässigen Menge an Schwermetallen wie Blei, Cadmium und Chrom.

In Abb. 45 bis Abb. 49 sind die Gehalte für die fünf Schwermetalle Chrom, Cadmium, Blei, Kupfer und Zink dargestellt. Beim Chrom-, Blei und Kupfergehalt befinden sich die drei haushaltsnahen Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 auf ähnlichen Niveaus, während bei der Sorte 3.10 kaum etwas gemessen wurde. Der Zinkgehalt unterscheidet sich bei den untersuchten Sorten nicht signifikant. Der Cadmiumgehalt der Sorte 3.10 liegt etwas höher als der der Sorten 1.02 und 1.04, während bei der Sorte 1.11 der geringste Cadmiumgehalt festgestellt wurde.

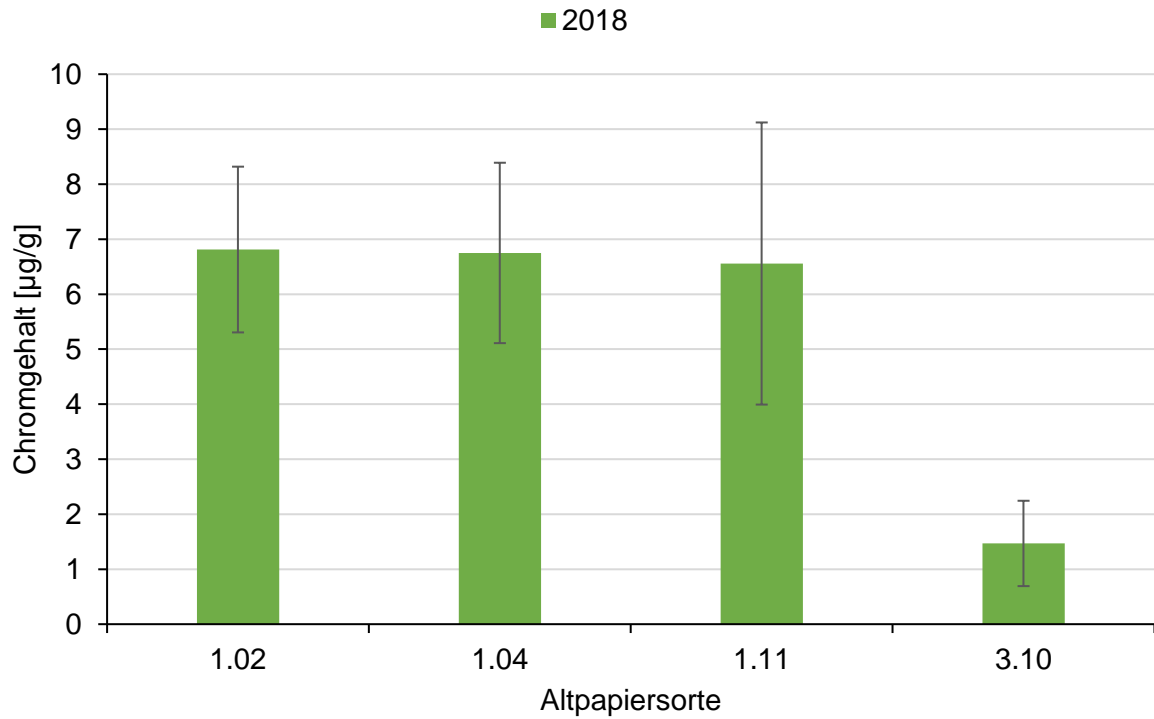


Abb. 45: Chromgehalt der untersuchten Sorten im Untersuchungsjahr 2018

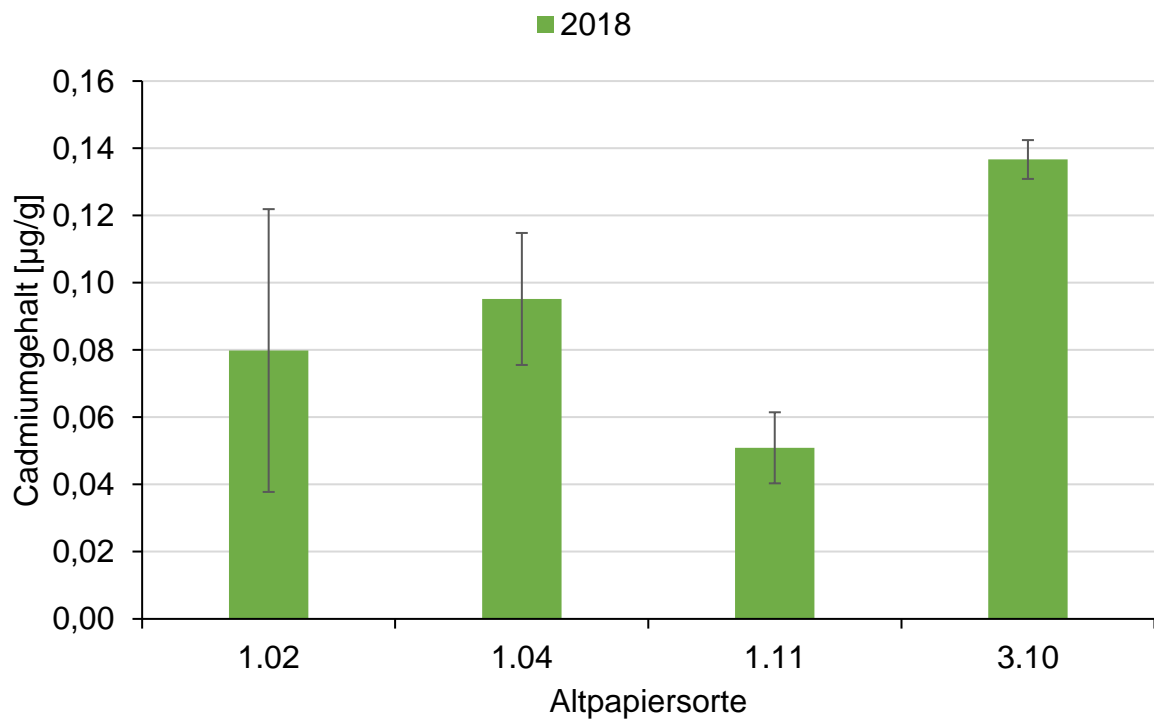


Abb. 46: Cadmiumgehalt der untersuchten Sorten im Untersuchungsjahr 2018

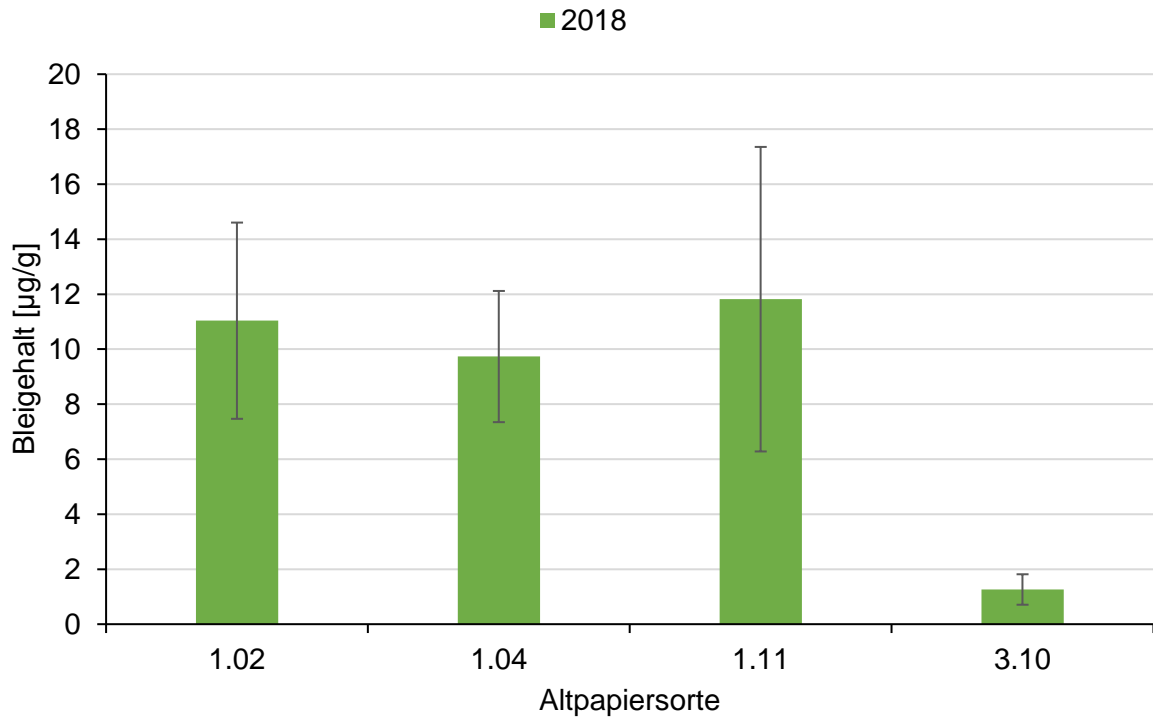


Abb. 47: Bleigehalt der untersuchten Sorten im Untersuchungsjahr 2018

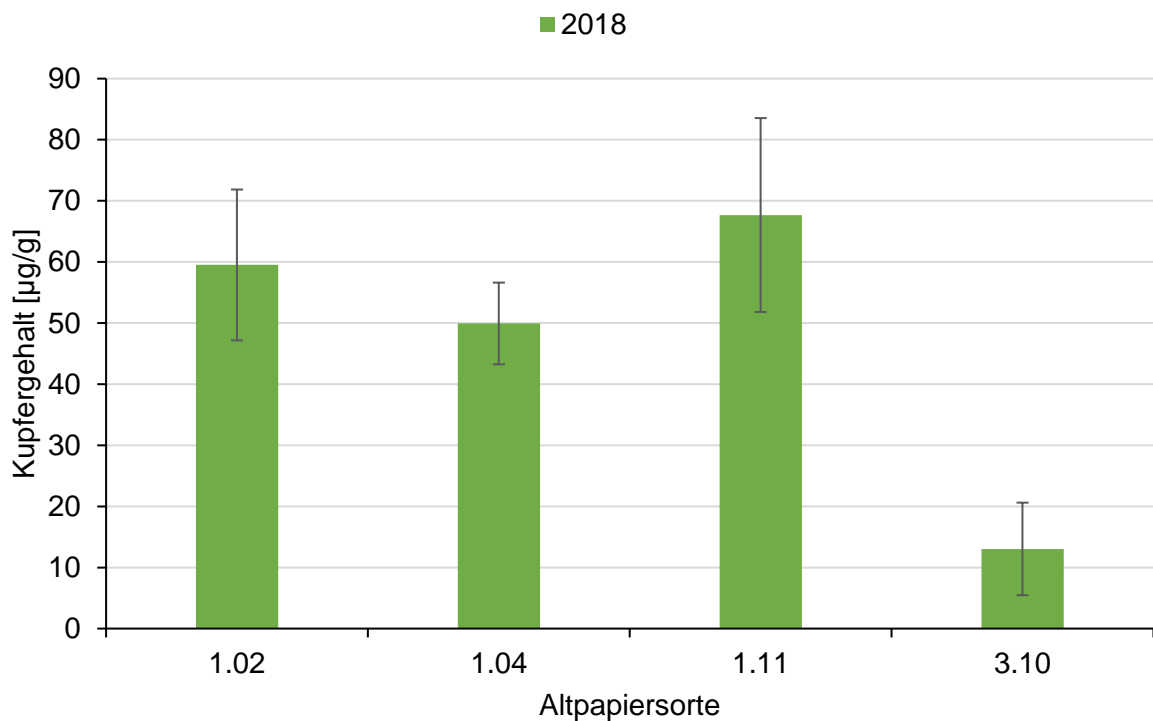


Abb. 48: Kupfergehalt der untersuchten Sorten im Untersuchungsjahr 2018

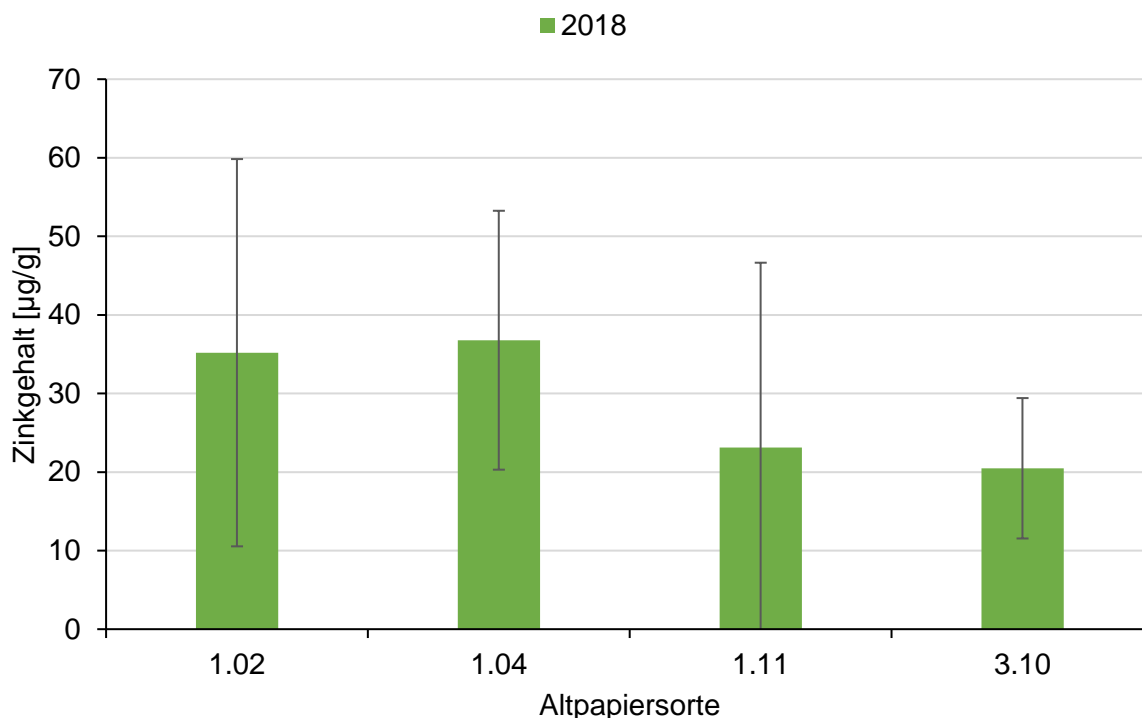


Abb. 49: Zinkgehalt der untersuchten Sorten im Untersuchungsjahr 2018

4.6.5. Phthalate

Die Haupteintragsquelle in den Altpapier-Recyclingkreislauf von Diisobutylphthalat resultiert aus der Verwendung von Dispersionklebstoffen bei der Endverarbeitung von Faltschachtelkartonagen. Dibutylphthalat wird vorwiegend als Weichmacher eingesetzt und kommt hauptsächlich in Kunststoffen und Klebstoffen aber auch in Druckfarben und Lacken zur Anwendung. Ebenfalls wird Diethylhexylphthalat als Weichmacher in Kunststoffen verwendet. Vereinzelt wurden in einigen Proben andere als die bereits erwähnten Phthalate wie z. B. Dimethylphthalat oder Diethylphthalat gemessen. Durch Adsorption an den Fasern können Substanzen wie Phthalate über das Altpapier in den Recyclingkreislauf gelangen. Aus Recyclingpapieren und -kartonagen mit Lebensmittelkontakt können Phthalate über die Gasphase in Lebensmittel migrieren. Einige Phthalate stehen im Verdacht, fortpflanzungsgefährdende Wirkung auf Mensch und Tier auszuüben.

Abb. 50 bis Abb. 53 zeigen die gemessenen Phthalate für die jeweiligen Sorten. Bei der Untersuchung 2010 wurde für die Sorten 1.02, 1.04 und 1.11 mengenmäßig am meisten Diisobutylphthalat festgestellt worden. Bei der aktuellen Untersuchung konnte ein deutlicher Rückgang von mindestens 75 % dieses Phthalats für die einzelnen Sorten gemessen werden, der auf eine freiwillige Selbstverpflichtung der Klebstoffhersteller zur Vermeidung dieses Stoffes zurückzuführen ist. Die höchsten Konzentrationen wurden bei Diethylhexylphthalat gemessen. Weitere Phthalate kommen nur in Konzentrationen unter 10 mg/kg vor. Generell weist die Sorte 1.04 die meisten Phthalate auf, während in der Sorte 3.10 kaum Phthalate zu finden sind.

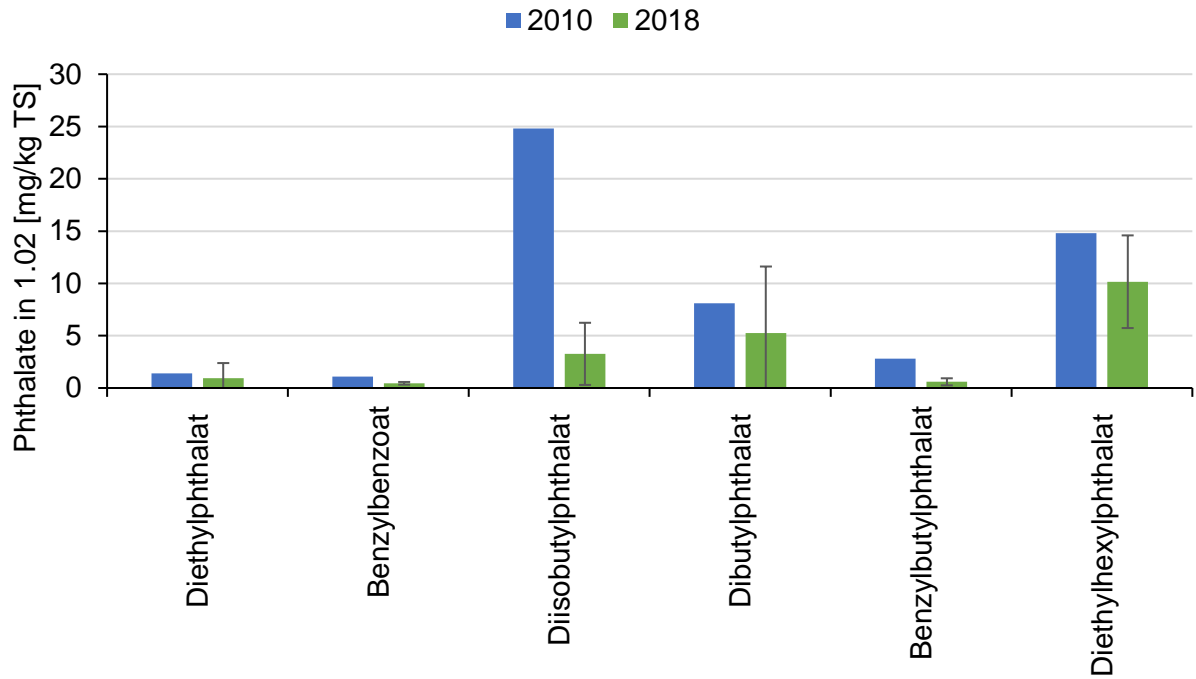


Abb. 50: Phtalatgehalte der Sorte 1.02 von 2010 bis 2018

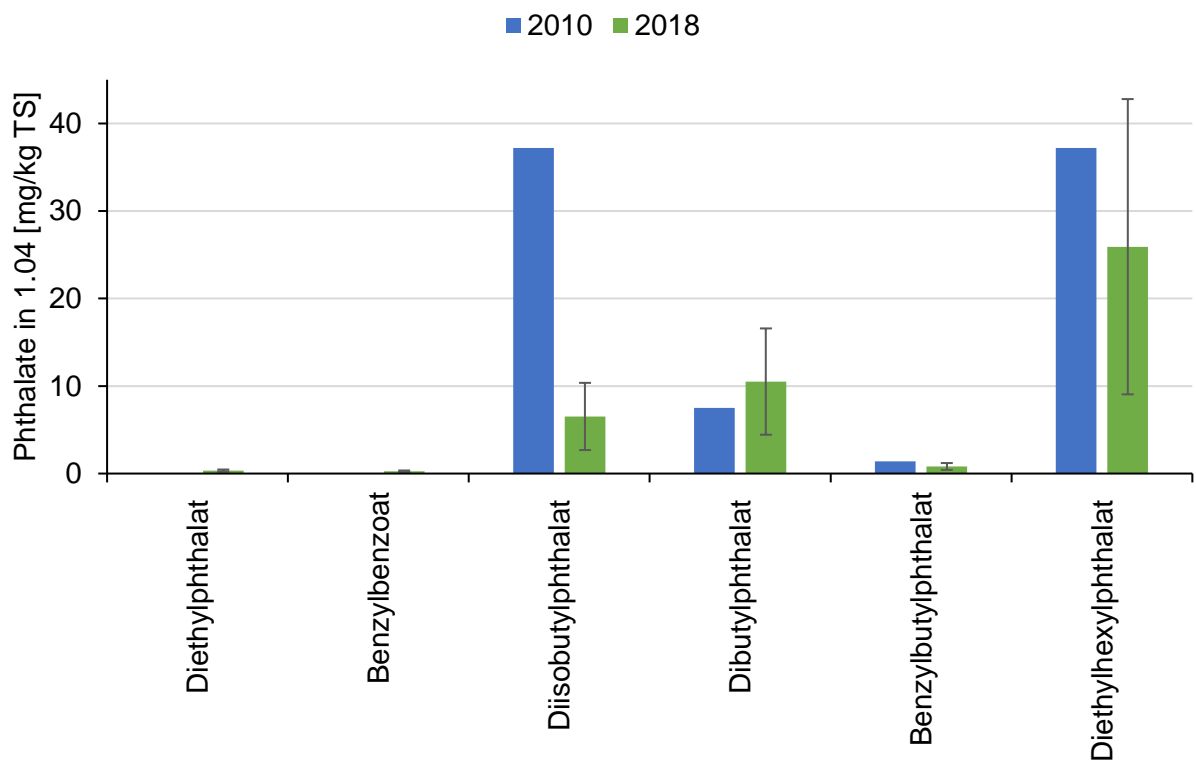


Abb. 51: Phtalatgehalte der Sorte 1.04 von 2010 bis 2018

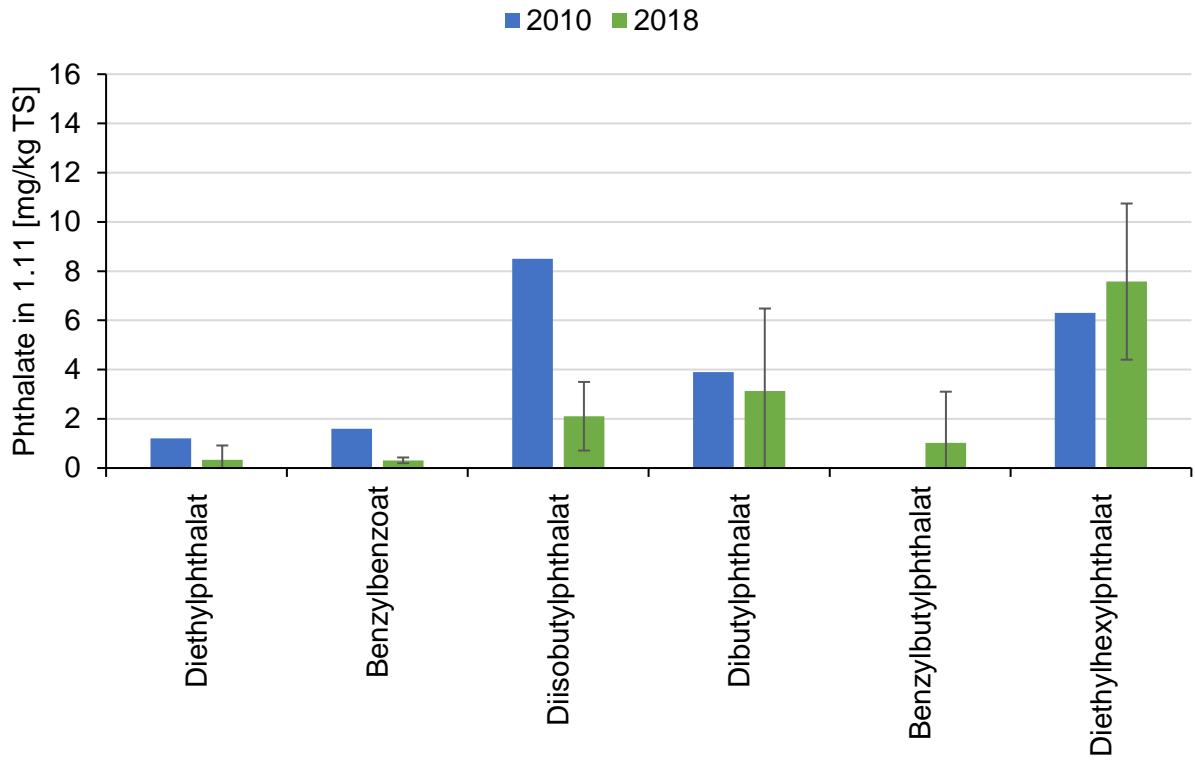


Abb. 52: Phtalatgehalte der Sorte 1.11 von 2010 bis 2018

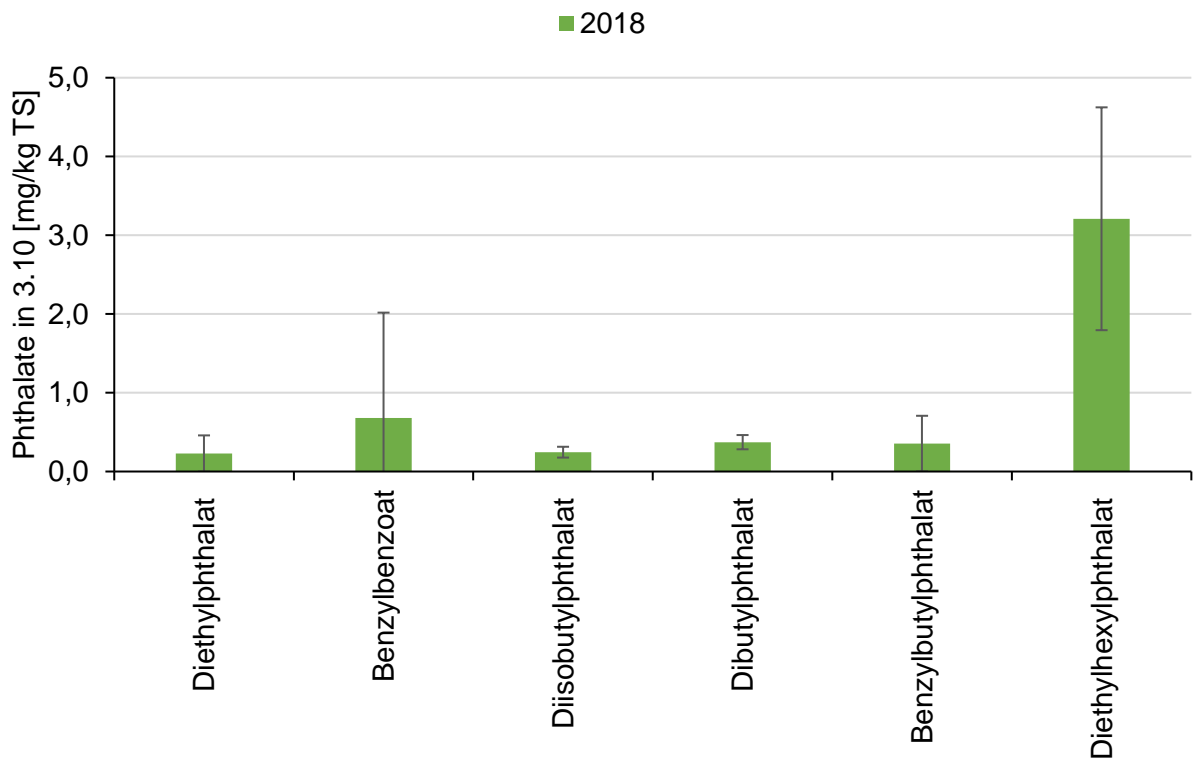


Abb. 53: Phtalatgehalt der Sorte 3.10 im Untersuchungsjahr 2018

5. Ergebnisse und Diskussion der Messsystementwicklung

5.1. Stand zu Projektbeginn

Die Analyse der Zusammensetzung von Altpapierproben erfolgte in bisher durchgeführten Projekten der Forschungsstelle vollständig manuell. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig. Die Auswertung einer Altpapierprobe in einer üblichen Größe von 100 kg kann dabei bis zu 10 Stunden dauern. In dem IGF-Vorhaben 17496 N "Modellierung und systematische Bewertung von Altpapiersortieranlagen" wurde von der Forschungsstelle eine halbautomatische Anlage zur Analyse der Zusammensetzung von Altpapierproben entwickelt [22, 23]. Mit dieser Anlage kann die Analysezeit auf ca. die Hälfte reduziert werden [22]. Abb. 54 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage zu Projektbeginn. Per Hand werden die einzelnen Objekte einer Altpapierprobe auf ein Zuführförderband gelegt. Die Objekte laufen in die Messeinheit, in der sie durch Bildanalyse einer von 6 verschiedenen Altpapierobjektclassen zugeordnet werden. Objekte, die diesen 6 Altpapierklassen nicht zugeordnet werden können (beispielsweise papierfremde Objekte und Papier, das für das Recycling ungeeignet ist), werden manuell analysiert.

Das erste Teilziel der Weiterentwicklung des Messsystems ist es, die bisher halbautomatische Anlage zu einer möglichst vollautomatischen Anlage zu erweitern, da durch eine vollautomatisierte Probenanalyse viel Arbeitszeit eingespart werden kann. Für eine vollautomatische Analyse ist es zum anderen notwendig, die Messeinheit der Anlage weiterzuentwickeln. Abb. 55 zeigt die Klassifikationserfolge für die 10 wichtigsten Objektclassen zu Beginn des Projekts. Es wird deutlich, dass einige der Klassen bereits gut erkannt werden, während andere Klassen noch deutliches Verbesserungspotenzial aufweisen. Im besten Fall sollen 17 Altpapierobjektclassen voneinander unterschieden werden können. Dies ist das zweite Teilziel der Weiterentwicklung des Messsystems.

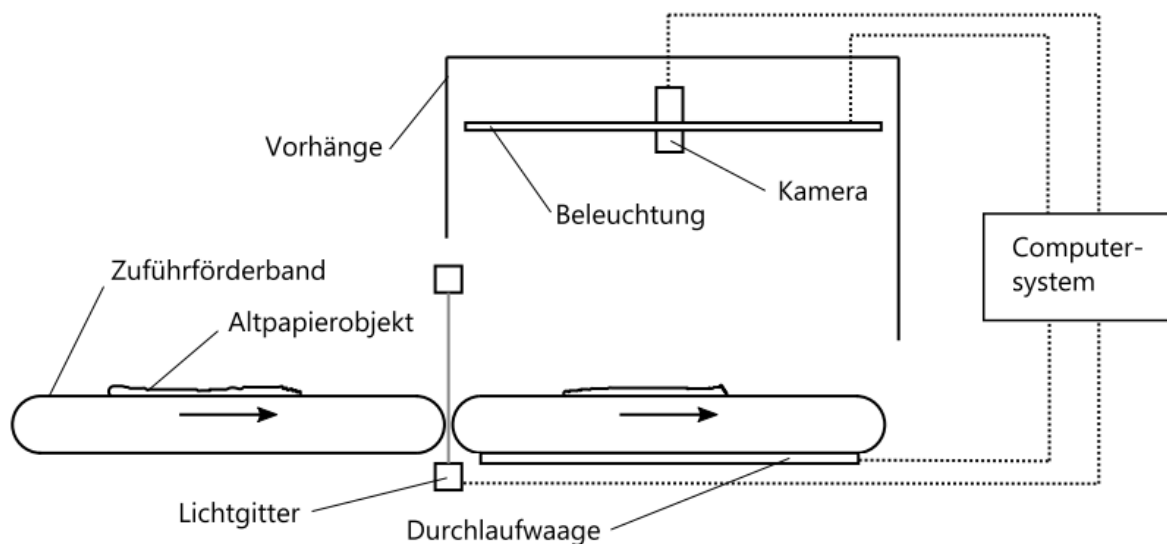


Abb. 54: Stand der automatischen Messanlage zu Projektbeginn

	Erfolgsrate der Klassifikation
Zeitungen	90%
Illustrierte	80%
Werbedrucke	65%
Papier (weiß)	85%
Papier (grau)	63%
Wellpappe (braun)	92%
Wellpappe (weiß)	51%
Karton (grau)	32%
Karton (weiß)	61%
Sonstige Verpackungen	31%

Abb. 55: Erfolgsrate der Klassifikation der 10 wichtigsten Papierobjektklassen zu Projektbeginn

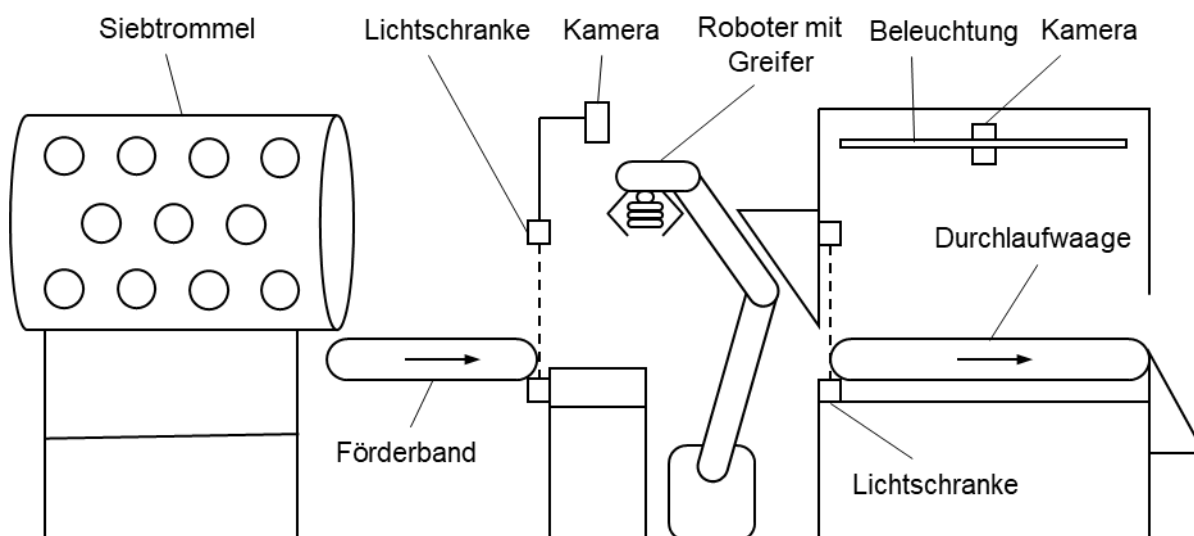


Abb. 56: Schematische Darstellung der automatischen Messanlage zu Projektende

5.2. Anlagenkonzept

Ziel des Messsystems ist es, Altpapierproben bis zu einer Menge von 100 kg vollautomatisch hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zu analysieren. Hierfür wurde ein Ansatz gewählt, der der manuellen Probenanalyse nachempfunden wurde: Bei der manuellen Analyse wird jedes Objekt aus der Gesamtprobe herausgegriffen, betrachtet und anschließend einer Klasse zugeordnet. Das Messsystem soll in gleicher Weise funktionieren. Abb. 56 veranschaulicht das Konzept des Messsystems, das im Folgenden beschrieben wird. Grundsätzlich ist die Anlage in zwei Teile

gegliedert. Der erste Teil der Anlage soll die Papierobjekte vereinzeln, während der zweite Teil der Anlage für die Klassifikation der Papierobjekte sorgt.

Im Betrieb der Anlage wird diese mit einer (Teil-)Probe befüllt werden. In einem ersten Schritt werden die Papierobjekte isoliert und unerwünschte Schmutzpartikel entfernt. Hierfür durchläuft die Probe zunächst ein Trommelsieb. In dieser Trommel können kleine Partikel, wie beispielsweise Sand, Glas oder Papierschnipsel, aus dem Messsystem ausgeschleust werden. Dieses Material wird in einem Behälter aufgefangen und manuell gewogen und dann entsorgt. Außerdem wird das Probenmaterial durch die Trommel deutlich entzerrt. Am Ausgang der Trommel fällt das Papier auf ein Förderband, an dessen Ende ein Roboter Papierobjekte einzeln in die Messzelle befördert. Hierfür ist eine Objekterkennung notwendig, die die Position der Papierobjekte ermittelt und an den Roboter weitergibt. Des Weiteren ist die Entwicklung eines geeigneten Greifsystems für den Roboter entscheidend, mit dem die Papierobjekte gegriffen und ins Messsystem eingelegt werden können. Um möglichst alle Papierobjekte greifen zu können, wurden verschiedene Greifprinzipien getestet. Beispielsweise können Papierobjekte sowohl mit Unterdruck angesaugt werden als auch mit einer Greifzange mechanisch gegriffen werden. Im eigentlichen Messsystem befinden sich Sensoren, die Daten zu den einzelnen Papierobjekten aufnehmen, die wiederum von einem Computersystem analysiert werden. Mit Hilfe von verschiedenen Algorithmen werden charakteristische Merkmale extrahiert, die Grundlage für eine Zuordnung in eine der definierten Stoffklassen mit Hilfe von trainierten Klassifikatoren aus dem Bereich des maschinellen Lernens sind.

5.3. Automatisierung im Detail

5.3.1. Vorvereinzelung der Altpapierprobe

Trommel: Eingangsseitig befindet sich eine in horizontaler Position hängende, variabel angestellte Aluminiumtrommel, die die Funktion der Vorvereinzelung erfüllt (siehe Abb. 57). Die Trommel ist 195 cm lang und hat einen Durchmesser von 90 cm und ist auf einer Welle montiert. An dieser Welle befinden sich an beiden Enden jeweils eingeschraubte Wellenstummel, welche wiederum mit Rillenkugellagern gelagert sind. Zur Lagerung der Trommel kommt eine Fest-Loslagerung zum Einsatz. Somit ist die Trommel durch die Festlagerung arretiert, es werden allerdings Längenänderungen der Trommelwelle durch die Loslagerung toleriert. Längenänderungen treten zum einen durch Wärmedehnungen auf und zum anderen ist das Gestell der Vorvereinzelung durch die geringe Steifigkeit beweglich, welches ebenfalls eine Verschiebung zwischen Welle und Lagerung hervorruft. Durch diese Bewegungsfreiheit werden unzulässig hohe Belastungen, welche auf die Lager wirken, ausgeschlossen. Da im Loslager axiale Bewegungen explizit erlaubt sind, ist bei der Konstruktion des Lagerflansches eine Toleranz berücksichtigt. Diese Toleranz ist bewusst groß gewählt, da an dieser Stelle auch Fertigungstoleranzen abgefangen werden. Das Wellenende ist in der Lage sich innerhalb der Toleranz zu bewegen, ohne dass es zu einem Herausrutschen der Trommel aus der Lagerung oder einem Anschlagen der Welle kommt.

Steuerung: Die Trommel wird über einen Schrittmotor angetrieben, der durch einen Keilriemen mit der Antriebswelle verbunden ist und an einem Flansch an der Ausgangsseite montiert ist. Der Antrieb der Vorvereinzelungstrommel über einen Mikrocontroller (Arduino Mega) gesteuert. Hauptaufgabe der auf dem Mikrocontroller installierten Software ist es, Steuersignale für den Motortreiber der Trommel zu generieren, welche letztendlich in einer kontrollierten Drehung der

Trommel resultieren. Die Geschwindigkeit der Trommel wird über eine analoge Spannung gesteuert. Die Software rechnet die analoge Spannung proportional in eine Ausgangsgeschwindigkeit um und generiert dementsprechende Steuersignale. Bei einer Änderung der Sollgeschwindigkeit wird die Ist-Geschwindigkeit mit einer konstanten Beschleunigung so lange angepasst, bis beide Geschwindigkeiten übereinstimmen. Aus Sicherheitsgründen muss eine Schwellenspannung überschritten werden, bevor die Software den Motortreiber aktiviert. Umgekehrt führt die Software ihre Abschaltoutine durch, falls diese Schwelle unterschritten wird. Die Abschaltoutine bremst die Trommel bis in den Stillstand ab. Danach wird überprüft, ob der Motortreiber direkt ausgeschaltet werden kann, oder ob es notwendig ist die Trommel kontrolliert rückwärts drehen zu lassen. Somit wird ein unkontrolliertes Zurückschwingen der Trommel verhindert.

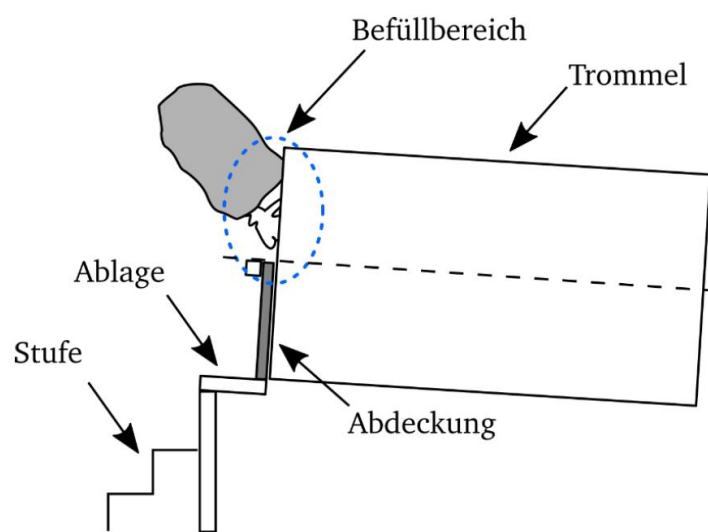


Abb. 57: Schematische Darstellung der Befüllung der automatischen Messanlage mit Altpapier

Förderung des Materials: Das in die Trommel eingefüllte Altpapier wird durch die langsame Drehung, den leichten Anstellwinkel und mithilfe der Schwerkraft zur Ausgangsseite befördert, wobei es aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften wie Gewicht und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Papierobjekte zu einer Vorvereinzelung kommt. In der Mantelfläche der Trommel befinden sich in regelmäßigen Abständen kreisförmige Aussparungen mit einem Durchmesser von 9 cm, durch die kleine Papierobjekte und Verunreinigungen aus dem System ausgeschleust werden. Die Vorvereinzelungstrommel ist an einem Gestell aufgehängt, welches aus Bosch-Rexroth Profilen zusammengesetzt ist. Vorvereinzelte Papierobjekte fallen auf der Ausgangsseite aus der Trommel auf ein Förderband.

5.3.2. Vereinzlung von Altpapierobjekten

Wie aus Abb. 58 zu entnehmen ist, unterteilt sich die Vereinzlung der Papierobjekte in vier Teilsysteme. Die Papierobjekte durchlaufen dabei von links nach rechts in der Reihenfolge eines

bis vier die Teilsysteme. Nach dem vierten Teilsystem werden die Papierobjekte an das Messsystem übergeben, in dem sie mit Hilfe von extrahierten Merkmalen klassifiziert werden.

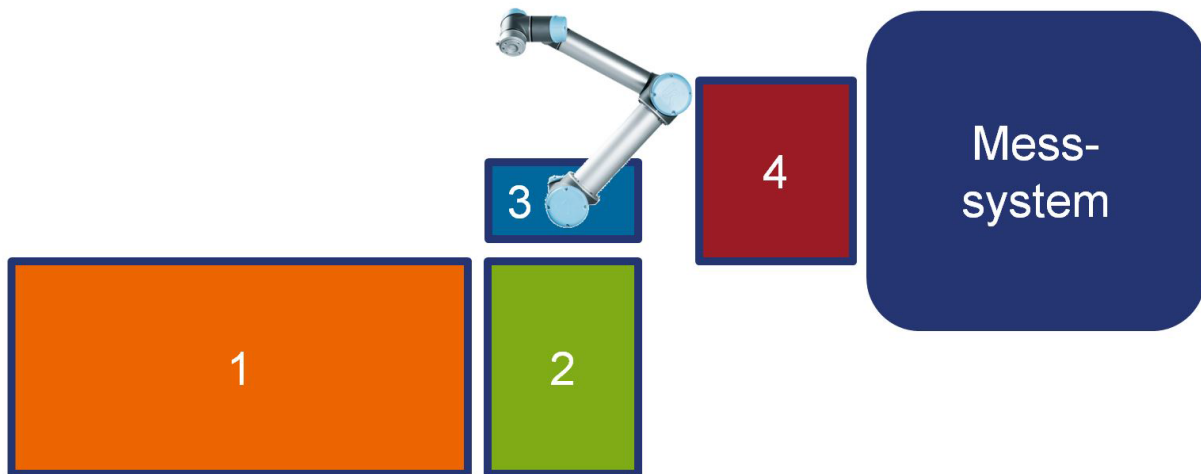


Abb. 58: Teilsystem des Vereinzelungsteils der automatischen Messanlage

Das erste Teilsystem hat die Aufgabe, die vorvereinzelten Papierobjekte zum Teilsystem 2 zu fördern. Das zweite Teilsystem dient als Ablagefläche für die Papierobjekte, damit diese vom Roboter aufgegriffen werden können. Das dritte Teilsystem besteht aus dem Roboter und einer geeigneten Sockelkonstruktion, um Kippsicherheit zu gewährleisten. Die Aufgabe des Roboters ist die Aufnahme einzelner Papierobjekte vom zweiten Teilsystem und deren Ablage auf dem vierten Teilsystem. Das vierte Teilsystem, die Aufnahme des Messsystems, stellt wie die Papierzuführung eine Fördereinrichtung dar, auf der die vom Roboter abgelegten Papierobjekte zum Messsystem transportiert werden.

Teilsystem 1: An der automatischen Messanlage stand bereits ein Förderband zur Verfügung, das zur Realisierung der Papierzuführung (Teilsystem 1) verwendet werden konnte. Es handelt sich hierbei um eine Konstruktion aus 45 mm x 45 mm und 90 mm x 45 mm Boschprofilen. Auf zwei Wellen ist ein Förderbandstoff gespannt, welcher eine Breite vom 1.000 mm hat. Das umgebaute Förderband ist in Abb. 59 abgebildet.

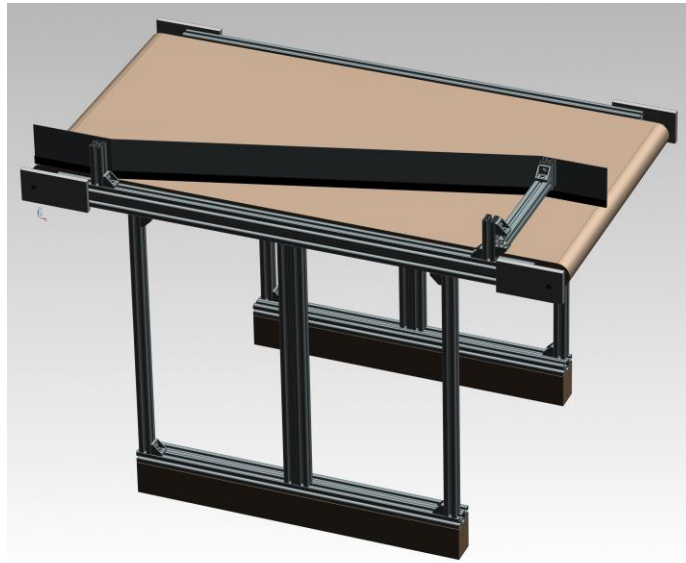


Abb. 59: CAD-Zeichnung von Teilssystem 1

Aufgrund der begrenzten Reichweite des Roboterarms und der limitierten Aufnahmebreite des Messsystems von 600 mm, musste die Förderbreite des Förderbands von 1.000 mm auf 600 mm über die Länge begrenzt werden. Daher wurde ein Führungsblech (siehe auch Abb. 60) angebracht. Die geraden Stücke des gebogenen Stahlblechs am Anfang und Ende dienen der Befestigung des Führungsblechs über dem Förderband mit einer Konstruktion aus Boschprofilen und Winkeln. An der unteren Kante des Führungsblechs ist ein Bürstenband aufgeklebt. Es soll das Blech zum Förderband hin abdichten und ein Durchrutschen der Papierobjekte verhindern.



Abb. 60: Aufnahmen des Führungsblechs

Teilsystem 2: Ein CAD-Modell der Aufnahmefläche der Papierobjekte ist in Abb. 60 dargestellt. Von der Lochplatte greift der Roboter einzelne Papierobjekte. Da der Roboter das Papier u. a. mit einem Saugkopf ansaugt, wurde die Platte als Lochplatte ausgeführt. An einem Ausleger über der Lochplatte wurde ein Lichtgitter und eine Webcam montiert. Die Lochplatte ist schwarz lackiert, da die Webcam einen hohen Kontrast zum vorwiegend hellen Altpapier benötigt. Die

Papierobjekte rutschen vom Förderband des Teilsystems 1 auf die Lochplatte. Das Förderband muss stoppen, damit möglichst nur ein Papierobjekt auf dem Tisch liegt und nicht vom folgenden herungeschoben wird. Dafür wurde ein Lichtgitter verbaut. Ein Plexiglasstreifen auf Höhe der Lochplatte und zwischen den Teilen des Lichtgitters verhindert, dass Papierobjekte in den Spalt zwischen Förderband und Lochblech fallen.

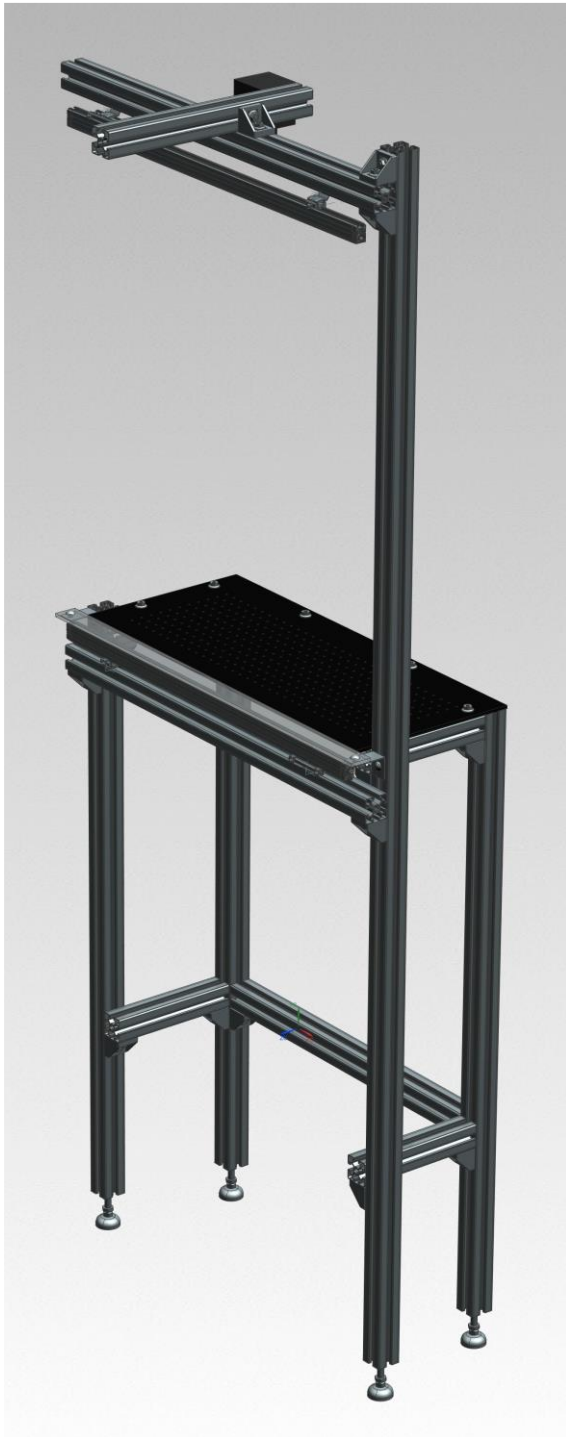


Abb. 61: CAD-Zeichnung und Detailaufnahme von Teilssystem 2

Teilsystem 3: Für Teilsystem 3 wurde zunächst ein Roboter ausgewählt. Die Wahl fiel auf einen UR5 der Firma Universal Robots. Dabei handelt es sich um den weltweit am meisten eingesetzten kollaborativen Roboter. Mit einem Arbeitsradius von 850 mm und einer Nutzlast von bis zu 5 kg eignet er sich ideal für die ihm zugedachte Aufgabe des Transports von Papierobjekten von Teilsystem 2 zu Teilsystem 4. Durch die geringe Grundfläche und die kompakte Bauform benötigt der Roboter wenig Platz und passt gerade in die vorgesehene Lücke zwischen Förderband und Zuführung zum Messsystem. Außerdem zeichnet sich der Roboter durch seine einfache Programmierung aus.

Der Roboter wurde ohne Greifer bestellt. Zum Greifen der Papierobjekte wurde eigenes ein Papiergreifsystem, basierend auf zwei unterschiedlichen Greifprinzipien, entwickelt. Bei dem Unterdrucksauger wird nach dem Venturi-Prinzip mithilfe von Druckluft ein Vakuum erzeugt. Der Förder-Ejektor FIPA 65.711 besteht aus einer Treibdüse, einer Fangdüse und einem Diffusor. Der Förder-Ejektor beschleunigt Druckluft als Treibmedium und zwischen den beiden Düsen wird Unterdruck erzeugt, womit Papierobjekte angesaugt werden können. Die für den Unterdrucksauger notwendige Druckluft wird aus dem Druckluftnetz des Gebäudes entnommen. Ein Drucksensor dient zur Zustandserkennung, ob ein Papierobjekt aufgenommen wurde. Die Greifzange besteht aus zwei gebogenen rechteckigen Aluminiumblechen, die im Ausgangszustand horizontal nach außen stehen und bei Aktivierung um 90 Grad nach unten klappen und einen linienförmigen Kraftschluss bilden. Die Greifzange wird über zwei Servomotoren angetrieben, die direkt am Roboterarm montiert sind. Zur Zustandserkennung, ob ein Papierobjekt aufgenommen wurde, wird die Isolationsfähigkeit von Papier ausgenutzt. Nach Anlegen von elektrischer Spannung an einen der Zangenarme fließt beim Schließen der Zange ohne dazwischenliegendes Objekt ein messbarer elektrischer Strom, weil Aluminium über gute elektrische Leitfähigkeit verfügt. Papier ist allgemein ein guter Isolator und der Stromkreis schließt sich in dem Fall, wenn ein Papierobjekt erfolgreich aufgenommen wurde, nicht. An der Seite des Roboterarms befindet sich ein Blech mit einer an der gegenüberliegenden Kante angebrachten Bürstenleiste. Falls das Greifen des Papierobjektes sowohl mit dem Unterdrucksauger als auch mit der Greifzange nicht funktioniert, wird es mithilfe der Bürste vom Lochblech gewischt. Hierfür dreht sich der Flansch, an dem sowohl der Unterdrucksauger als auch die Greifzange befestigt sind, um 90 Grad und das Bürstenblech fährt das Lochblech entlang.

Um den Roboter gegen Kippen abzusichern, wurde ein Sockel bestehend aus einem 120 mm x 120 mm Boschprofil und vier schweren Stahlbalken konstruiert. In Abb. 62 ist links das CAD-Modell des Robotersockels dargestellt. Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Sockel inklusive Roboter und Papiergreifer.

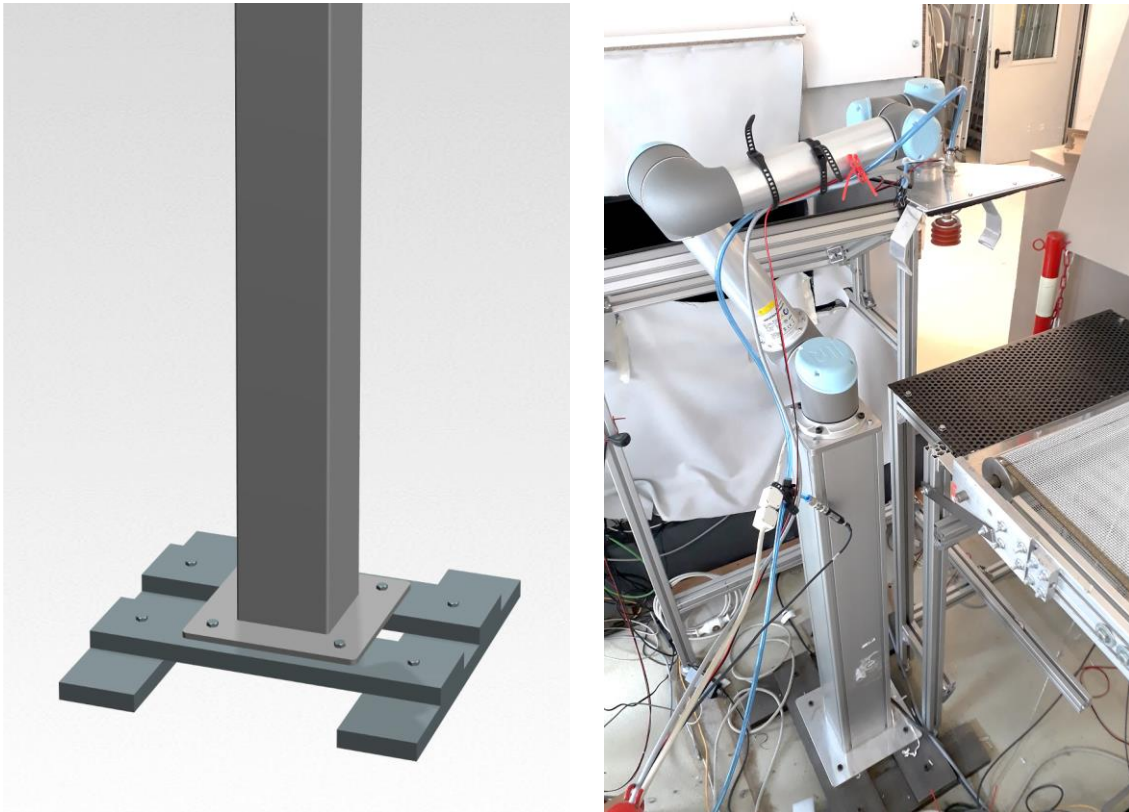


Abb. 62: CAD-Zeichnung des Sockels für den Roboter und Gesamtaufnahme von Teilsystem 3 inklusive Roboter und eigens entwickeltem Papiergreifer.

Teilsystem 4: Die Aufnahme des Messsystems (Teilsystem 4) dient gleichzeitig als Ablagefläche des Roboters und zum Weitertransport der Papierobjekte in das Messsystem. In Abb. 63 ist links das CAD-Modell dargestellt. Eine Rampe, die nach unten hin zusammenläuft, bildet das Hauptstück von Teilsystem 4. Sie besteht aus einer 2 mm dünnen, sehr glatten Aluminiumplatte, die durch Biegen Seitenbegrenzungen erhält. Die Seitenbegrenzungen sind nötig, um ein seitliches Herunterrutschen der Papierobjekte zu verhindern. Abb. 63 zeigt rechts ein Foto von Teilsystem 4.

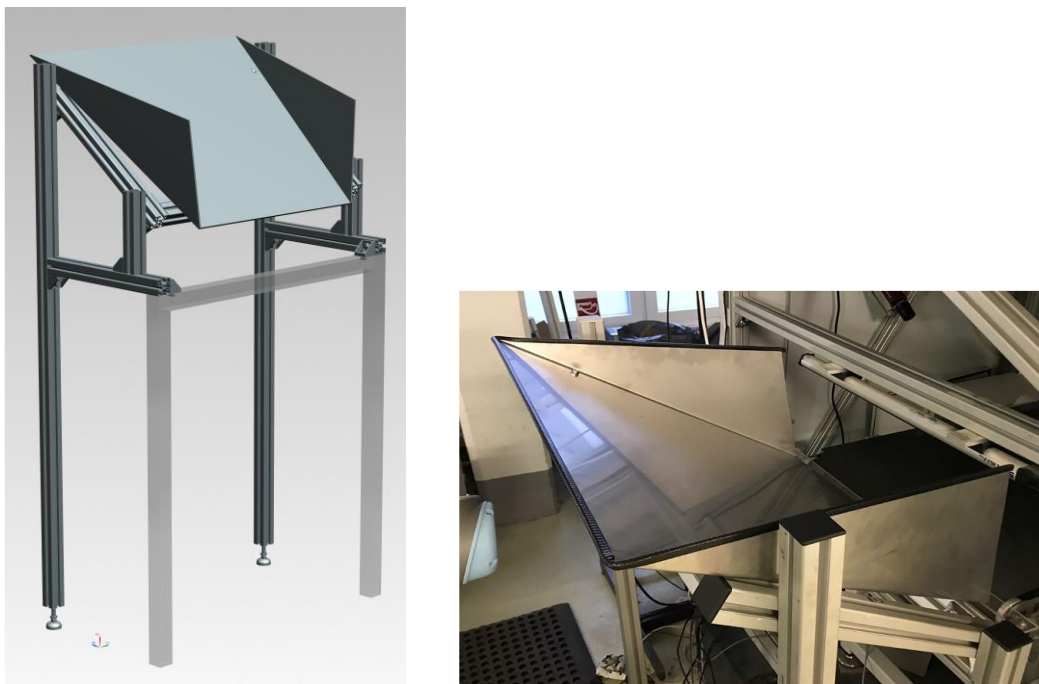


Abb. 63: CAD-Zeichnung und Aufnahme von Teilsystem 4

Gesamtsystem: Zur Veranschaulichung sind die Teilsysteme 1 bis 4 in Abb. 64 in ihrer Lage zueinander dargestellt.

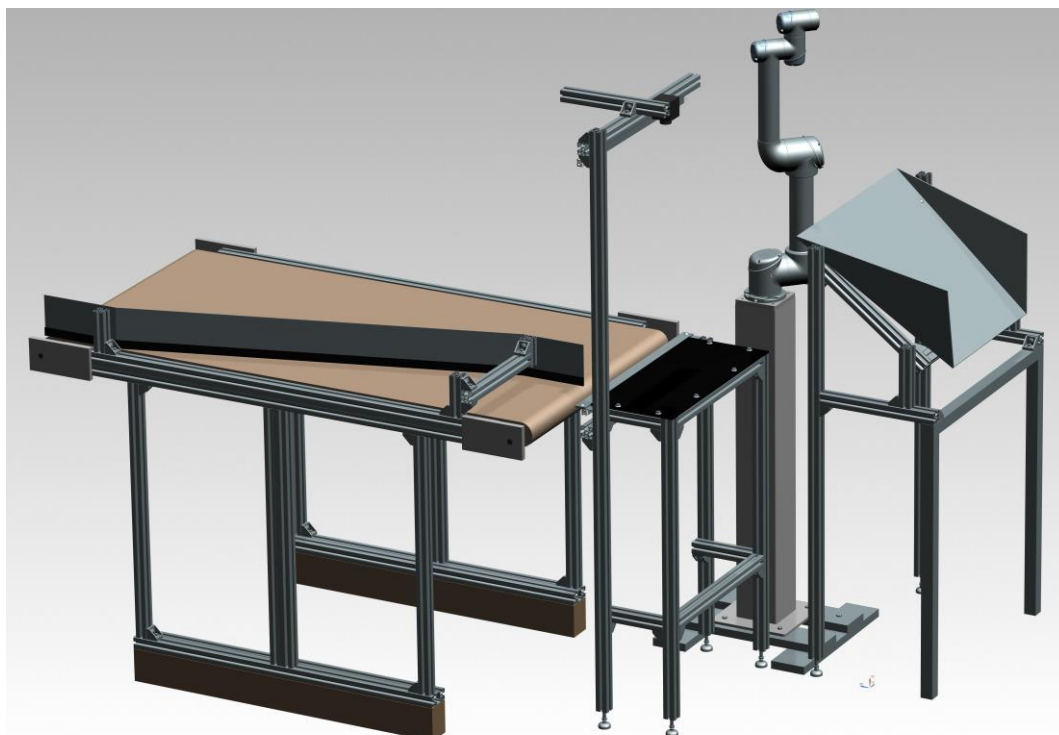


Abb. 64: CAD-Zeichnung der gesamten Vereinzelungseinheit

5.3.3. Analyseprozess

Der Analyseprozess wurde im Wesentlichen gleich gehalten, jedoch an der ein oder anderen Stelle optimiert. Der Roboterarm transportiert jeweils ein Objekt und legt es auf die schiefe Ebene der Rampe, von wo es durch die Schwerkraft in die Messzelle rutscht. Die Messzelle besteht aus einer Lichtschranke zur Steuerung des Zulaufs, einem Förderband zum Transport des Papierobjekts, einer Waage, einer Kamera und Vorhängen zur Verdunkelung. Die Messzelle steht auf einem stabilen Fundament, um den ungestörten Betrieb der sensiblen Elektronik zu gewährleisten. Darüber hinaus sind die Komponenten mit einem Computer verbunden, auf dem die Ergebnisse mithilfe der Software MATLAB von MathWorks GmbH verarbeitet werden. Wenn ein Papierobjekt die am Eingang liegende Lichtschranke auslöst, setzt sich das innerhalb der Messzelle liegende Förderband in Bewegung und transportiert das Objekt in eine Position, in der die Mustererkennung und Klassifikation des Papierobjekts durchgeführt werden können. Mithilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen werden Merkmale extrahiert, bewertet und eine Klassifizierung des Papierobjektes mit Hilfe Machine Learning Algorithmen vorgenommen. Als Hardware dient eine Kamera, die an der Decke der Messzelle angebracht ist. An der Decke befinden sich LED-Leisten zur optimalen Beleuchtung. Sobald die Klassifikation abgeschlossen ist, setzt sich das Förderband wieder in Bewegung und transportiert das Papierobjekt zum Ausgang. Es wird an eine weitere Rampe übergeben und rutscht aus der Messzelle hinaus in einen dafür vorgesehenen Behälter.

5.3.4. Validierung

Mit Hilfe einer Versuchsreihe wurde die Funktionalität der Anlage untersucht. Die Trommel wird zu Beginn der Versuchsreihen mit Altpapierproben befüllt. Die Probenauswahl erfolgt zufällig und umfasst Papierobjekte verschiedener Ausmaße und Gewichtsklassen. Ergebnis der Versuchsreihe ist eine Aufzeichnung und eine Analyse der auftretenden Prozessfehler.

Zur Auswertung der Messreihen werden die aufgezeichneten Daten der Prozessabschnitte der Anlage und der jeweiligen Teilfunktionen in Zusammenhang gebracht und zur besseren Übersicht in einem Fehlerbaum grafisch dargestellt (siehe Abb. 65) Die Teilfunktionen der jeweiligen Prozessabschnitte werden in rautenförmigen Kästen ihrer chronologischen Prozessabfolge nach dargestellt. Die Anzahl erfolgreich abgeschlossener Teilfunktionen werden dabei in grüner Schrift dokumentiert und verlassen den rautenförmigen Kasten am unteren Ende. Die Anzahl nicht erfolgreich abgeschlossener Teilfunktionen werden wiederum in roter Schrift dokumentiert und verlassen den rautenförmigen Kasten an der rechten Ecke. Da die Erfassung eines einzelnen Papierobjekts durch die Anlage beim Prozessschritt Erkennung im Bereich der Vereinzelung erfolgt, ist dies auch der Ausgangspunkt des Fehlerbaums.

Es zeigt sich, dass mehr als 80 % der Papierobjekte von der Anlage automatisch verarbeitet werden können. Die meisten Papierobjekte, die nicht verarbeitet werden können, landen mit Hilfe der am Roboter montierten Kehrvorrichtung in einer Box und können dem Gesamtprozess erneut zugeführt oder manuell analysiert werden.

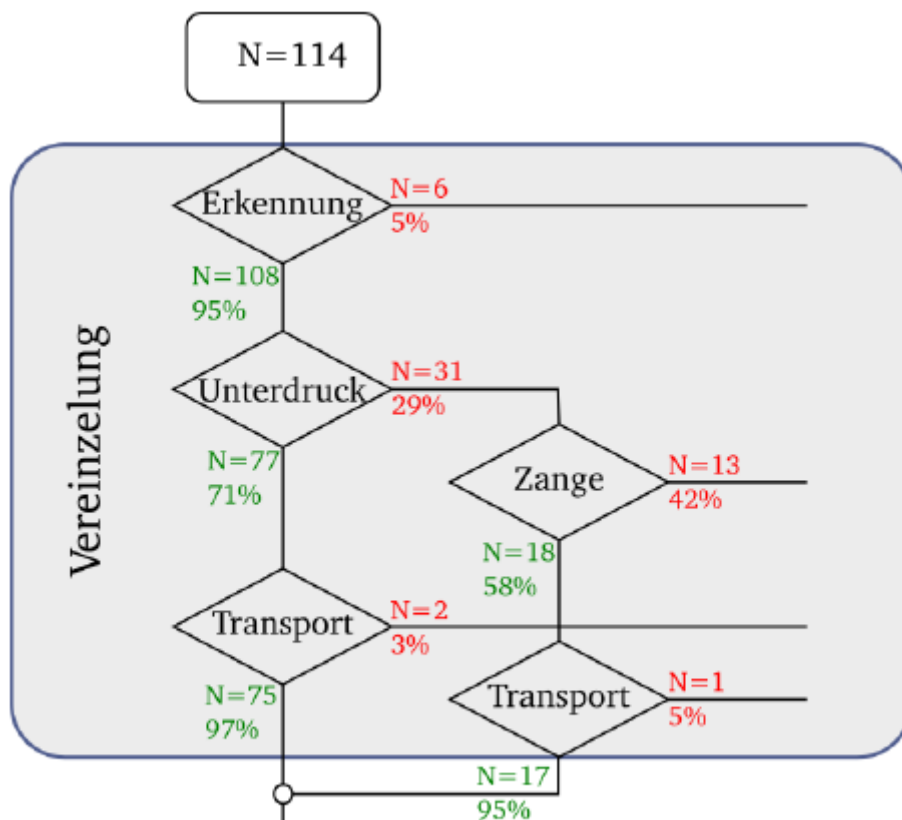


Abb. 65: Fehlerbaum bei der Validierung des Messsystems

5.4. Objektklassifikation

5.4.1. Optimierung der bisherigen Merkmalsextraktion

In dem IGF-Vorhaben 17496 N "Modellierung und systematische Bewertung von Altpapiersortieranlagen" wurde eine große Anzahl an verschiedenen Bildanalysealgorithmen vorgestellt, mit Hilfe derer Merkmale zur Charakterisierung der Altpapierobjekte aus den Bilddaten extrahiert wurden [22, 23]. Auf Grundlage der so gewonnenen Daten wurden Klassifikatoren trainiert, die dann wiederum in der Lage waren, unbekannte Objekte zu klassifizieren.

Bei der Durchsicht der Algorithmen fielen insbesondere die komplexen, teilweise undurchsichtigen Rechenoperationen und die damit verbundenen langen Berechnungszeiten auf. Die Bildanalyse wurde daher komplett neu programmiert. Bei der Programmierung wurde insbesondere auf einfache Operationen und Nachvollziehbarkeit Wert gelegt. Der Matlab-Code der Algorithmen ist im Anhang des Berichts zu finden. Tab. 3 zeigt eine Übersicht der neu definierten Algorithmen.

Tab. 3: Übersicht der überarbeiteten Papiermerkmale der Waage und der Bildanalyse

Merkmal	Beschreibung
Masse	Masse in Gramm, gemessen von der Durchlaufwaage
Länge	Lange Achse in Pixel einer Ellipse um das Papierobjekt
Breite	Kurze Achse in Pixel einer Ellipse um das Papierobjekt
Fläche	Anzahl der Pixel in der Maske des segmentierten Objekts
Quadratigkeit	Verhältnis Länge zu Breite
Flächenmasse	Fläche bezogen auf die Masse
Anteil Schwarz	Anteil der Pixel mit $0 < S < 0,5$ und $0 < H < 0,1$
Anteil Dunkelgrau	Anteil der Pixel mit $0 < S < 0,5$ und $0,1 < H < 0,4$
Anteil Grau	Anteil der Pixel mit $0 < S < 0,5$ und $0,4 < H < 0,5$
Anteil Braun	Anteil der Pixel mit $20^\circ < H < 40^\circ$ und $0,5 < S < 1$
Anteil Weiß	Anteil der Pixel mit $0 < S < 0,5$ und $0,5 < H < 1$
Mittelwert Farbton	Mittelwert der h-Werte (HSV-Farbraum)
Std.Abw. Farbton	Standardabweichung der h-Werte (HSV-Farbraum)
Mittelwert Sättigung	Mittelwert der s-Werte (HSV-Farbraum)
Std.Abw. Sättigung	Standardabweichung der s-Werte (HSV-Farbraum)
Mittelwert Helligkeit	Mittelwert der v-Werte (HSV-Farbraum)
Std. Abw. Helligkeit	Standardabweichung der v-Werte (HSV-Farbraum)
Mittelwert Optische Aufheller	Mittelwert der h-Werte (HSV-Farbraum) des Differenzbildes aus Bildern bei weißer Beleuchtung und weißer + UV Beleuchtung
Std.Abw. Optischer Aufheller	Standardabweichung der h-Werte (HSV-Farbraum) des Differenzbildes aus Bildern bei weißer Beleuchtung und weißer + UV Beleuchtung

Da die Bild- und Massedaten aus dem IGF-Vorhaben 17496 N noch vorhanden waren, konnten die neuen Algorithmen auf die gleichen Fotos angewandt werden und somit ein direkter Vergleich zwischen den berechneten Merkmalen gezogen werden. Es zeigte sich, dass mit den durch die neuen Algorithmen erhaltenen Daten leicht verbesserte Klassifikationsraten für einige Klassen erzielen ließen. Aufgrund der einfachen Algorithmen ließ sich gleichzeitig auch eine deutliche Reduzierung der Rechenzeit erreichen. Eine Zusammenführung beider Datensätze führte zu keiner weiteren Verbesserung der Klassifikationsraten, was darauf schließen lässt, dass die in beiden Datensätzen enthaltenen Informationen ziemlich gleichwertig sind. Aus diesem Grund wurden die alten Algorithmen verworfen und nur noch die neuen Algorithmen für die Bildanalyse verwendet.

5.4.2. Neue Sensoren

3D-Kamera

Die Messung des Volumens der Papierobjekte wurde zu Projektbeginn als weiteres möglicherweise gewinnbringendes Merkmal zur Unterscheidung der verschiedenen Papierklassen eingestuft. Ein Ansatz ist die Bestimmung des Volumens mit Hilfe einer 3D-Kamera. Viele 3D-Kameras funktionieren nach dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung (engl. Time-of-Flight). Eine Time-of-Flight-Kamera (ToF-Kamera) ist ein Range-Imaging-Kamerasystem, das mit Hilfe von Time-of-Flight-Techniken den Abstand zwischen der Kamera und dem Objekt für jeden Punkt des Bildes auflöst, indem es die Umlaufzeit eines künstlichen Lichtsignals misst, das von einem Laser oder einer LED bereitgestellt wird. Neben den industriellen und damit auch hochpreisigen 3D-Kameras kam auch eine weitere Option in Betracht: Microsoft bietet für die Spielekonsole Xbox unter dem Namen Kinect ein 3D-Kamera-System für interaktive Spiele an. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Massenprodukt handelt, ist dieses Kamera-System im Vergleich zu ähnlichen Produkten besonders preiswert. Des Weiteren bietet der standardmäßig vorhandene USB 3.0 Anschluss ideale Voraussetzungen für die Nutzung der Kamera an einem Computer. Aus diesen Gründen wird die Microsoft Kinect auch häufig für wissenschaftliche Zwecke verwendet [24], so auch in diesem Projekt. Die 3D-Kamera wurde der bereits vorhandenen RGB-Kamera innerhalb der Messzelle integriert (siehe Abb. 66). Statt eines Farbwerts liefert sie für jeden Pixel eine Tiefeninformation, d. h. ein Maß für den Abstand des Bildpunktes zum Kamerasensor. Nimmt man mit der Kamera ein Bild des Förderbands in der Messzelle ohne und mit einem Papierobjekt auf, enthält das Differenzbild Informationen über das von dem Papierobjekt eingenommene Volumen. Abb. 67 zeigt links die Aufnahme zweier Papierobjekte auf dem Förderband in der Messzelle, während rechts das beschriebene Differenzbild zu sehen ist. Je heller ein Pixel dargestellt ist, desto näher befindet er sich an der Kamera und dementsprechend mehr Volumen nimmt das Objekt an dieser Stelle ein. Die Summe über alle Grauwerte ist somit ein Maß für das Volumen des analysierten Objekts und wird als weiteres Merkmal für die Klassifikation in den Merkmalskatalog aufgenommen.

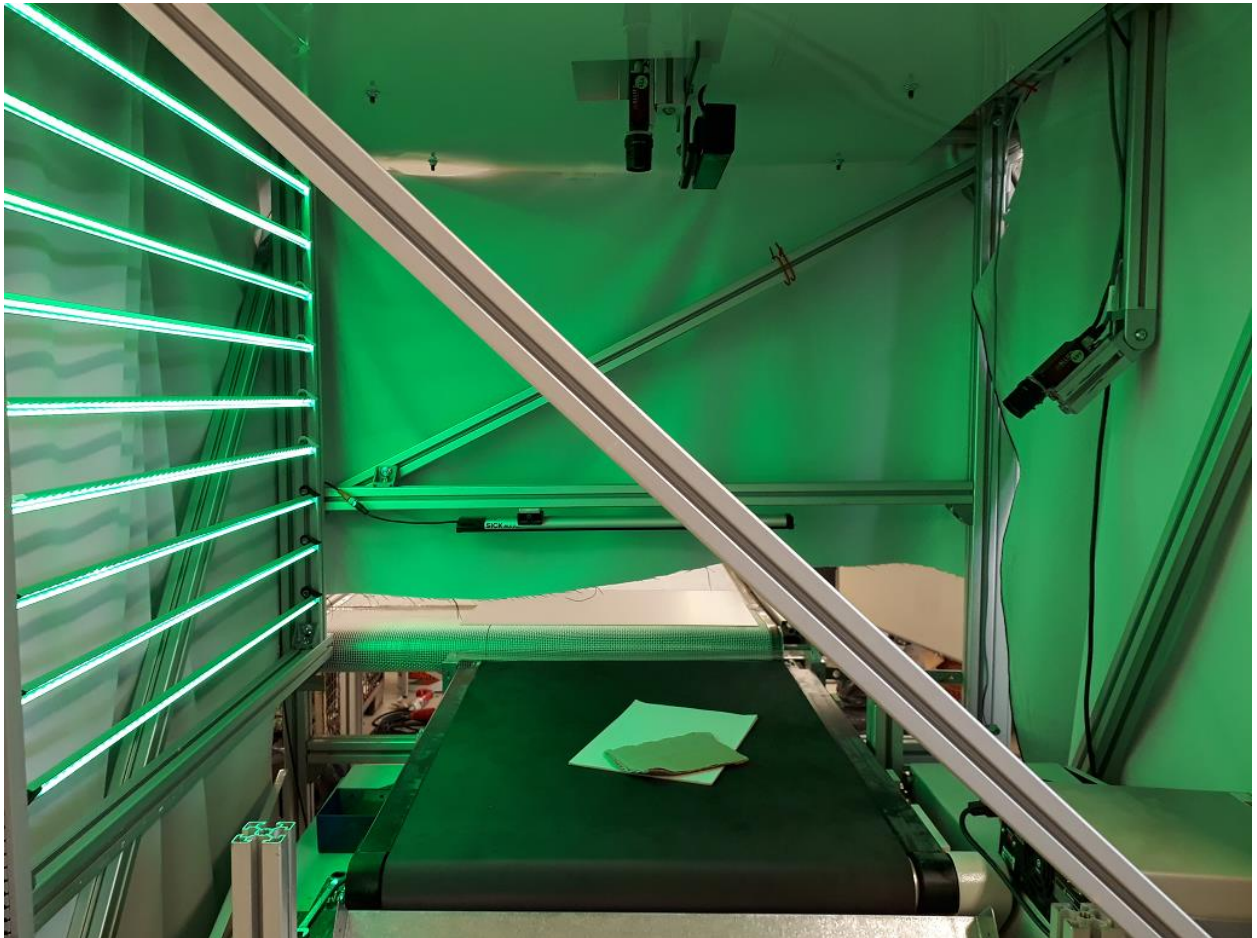


Abb. 66: Messzelle mit Glanzsensor, RGB-Kamera und 3D-Kamera

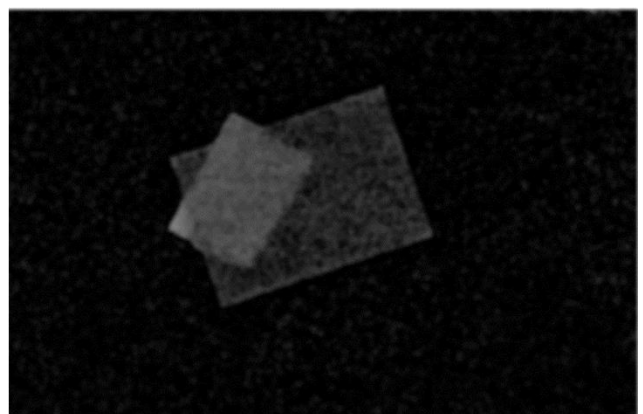
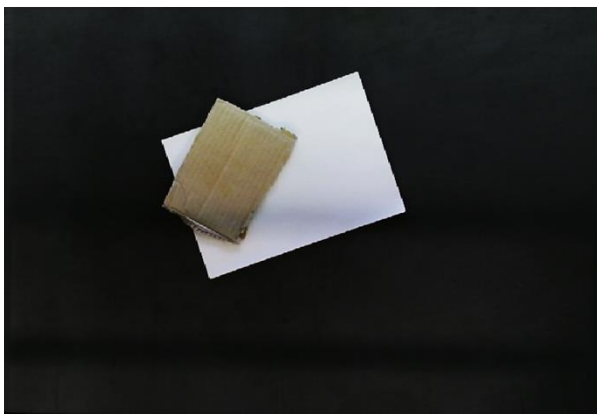


Abb. 67: Vergleich zwischen RGB-Kamera-Aufnahme (links) und 3D-Kamera-Aufnahme (rechts)

Glanzsensoren

Ein weiteres Ziel war es, einen Glanzsensor in das Messsystem zu integrieren. Die digitale Bildanalyse ermöglicht als berührungslose Messmethode, die unebenen Altpapierobjekte glanztechnisch untersuchen zu können. Abb. 66 zeigt die Integration des Sensors in das Messsystem. Eine LED-Beleuchtung aus zehn Einzelbändern wurde in das Grundgestell der Messanlage eingebaut und mit einer eigens dafür entwickelten elektrischen Ansteuerung verbunden. Eine RGB-Industriekamera ist im Rahmen der Inbetriebnahme schräg zur Probenauflagefläche ausgerichtet worden. Aus den Einzelbildern einer Beleuchtungsserie wurden für mehrere definierte Bildausschnitte Glanzkurven gebildet. Aus diesen Glanzkurven erfolgt die Bestimmung charakteristischer Kennwerte. Zu den Kennwerten gehören u. a. der maximale Glanzwert, die Halbwertsbreite und der Flächeninhalt einer Glanzkurve. Für die Überprüfung des entwickelten Algorithmus wurden drei Altpapiergruppen unterschiedlichen Glanzgrades untersucht. Die statistische Auswertung ergab, dass Altpapierobjekte zuverlässig den Gruppen matt, mattglänzend und hochglänzend zugeordnet werden können. Der Nachweis eines funktionsfähigen Glanzsensors erfolgte mit Altpapierobjekten unterschiedlichen Glanzes. Die nach subjektivem Glanzempfinden gruppierten Altpapierproben können vom Sensor sehr gut voneinander unterschieden werden.

Hyperspektralkamera

Zum Ende der Laufzeit des Projekts wurde die Versuchsanlage durch eine Hyperspektralkamera FX17 der Firma Specim, Spectral Imaging Ltd erweitert. Die Kamera besitzt einen InGaAs-basierten Sensor, der im nahinfraroten Wellenlängenbereich von 900 bis 1700 nm sensitiv ist. Die Analyse der NIR-Spektren und Ableitung von charakteristischen Merkmalen würde den Rahmen des Projektes überschreiten und wird daher aus dem Projekt ausgegliedert. Der Literatur ist zu entnehmen, dass mit Hilfe solcher NIR-Hyperspektralkameras folgende papierspezifischen Eigenschaften messbar sind und damit zur weiteren Verbesserung der Klassifikation beitragen können:

- Ligningehalt [25]
- Füllstoffe
- Unterscheidung von Druckfarben [26]
- Feuchtegehalt [27]
- Unterscheidung von Papier und Kunststoffen [28].

5.4.3. Klassifikation

Etwa 7.000 Papierobjekte wurden nach den oben beschriebenen Verfahren analysiert und Merkmale extrahiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass jede der 10 Klassen ungefähr gleich häufig vertreten war. Der gleiche Klassifikator, eine quadratische Support Vector Machine, der auch zur Aufnahme des Ist-Zustands zu Projektbeginn verwendet wurde, wurde mit den Merkmalen der Papierobjekte trainiert und validiert. Zum Einsatz kam eine 5-fache Cross-validierung. Eine Runde der Cross-Validierung besteht darin, eine Stichprobe von Daten in komplementäre Teilmengen aufzuteilen, die Analyse an einer Teilmenge (dem so genannten Trainingsset) durchzuführen und die Analyse an der anderen Teilmenge (dem so genannten Validierungsset oder Testset) zu validieren.

Abb. 68 zeigt die Verwechslungsmatrix des verwendeten Klassifikators für die klassifizierten Objekte. Jede Spalte der Matrix repräsentiert die Instanzen einer vorhergesagten Klasse, während jede Zeile die Instanzen einer tatsächlichen Klasse repräsentiert. Der Name der Matrix ergibt sich aus der Tatsache, dass es leicht zu erkennen ist, ob das System zwei Klassen verwechselt. In der Matrix erkennt man beispielsweise, dass nur 49 % der „sonstigen Verpackungen“ (Klassennummer 15) als solche klassifiziert wurden, weitere 34 % aber immerhin der Objekte als eine der anderen Verpackungsklassen (Klassen 8, 9, 10 und 12) identifiziert wurden. Lediglich 17 % der „sonstigen Verpackungen“ wurde als eine der grafischen Klassen (Klassen 1, 2, 3, 5 und 6) eingeordnet.

Abb. 69 stellt die Erfolgsraten der Klassifikation aus Abb. 68 in Form eines Balkendiagramms dar. Vergleicht man die Zahlen mit den Erfolgsraten zu Projektbeginn (siehe Abb. 55), so wird in einigen Objektklassen eine deutliche Steigerung der Erkennungsraten sichtbar. Abb. 70 stellt die absolute Verbesserung der Erkennungsraten als Differenz der Erkennungsraten von Anfang und Ende des Projekts ebenfalls in Form eines Balkendiagramms dar. Insbesondere die Klassen „Papier grau“, „Karton grau“ und „sonstige Verpackungen“ konnten deutlich besser von den anderen Klassen unterschieden werden als zu Projektbeginn. Auch die Klassen „Wellpappe weiß“ und „Karton weiß“ verzeichneten eine Verbesserung um 7 %. Alle anderen Klassen (mit Ausnahme der Klasse „Zeitungen“) erzielten immerhin leichte Verbesserungen.

Model 1 (Quadratic SVM)

True class	1	89%	2%	6%		1%		1%	1%	<1%	<1%		89%	11%	
	2	4%	83%	6%	<1%			4%	2%	1%	<1%		83%	17%	
	3	7%	4%	67%	3%	1%	<1%	2%	5%	8%	3%		67%	33%	
	5		<1%	2%	89%	4%		1%	<1%	2%	2%		89%	11%	
	6	1%	<1%	1%	4%	80%	<1%	1%	2%	4%	5%		80%	20%	
	8			<1%			93%	2%	<1%	<1%	4%		93%	7%	
	9	2%	6%	6%	1%	2%	5%	58%	8%	5%	9%		58%	42%	
	10	1%	3%	7%	<1%	3%	1%	7%	57%	11%	9%		57%	43%	
	12	<1%	<1%	5%	2%	4%		3%	11%	68%	6%		68%	32%	
	15	2%	1%	6%	2%	6%	10%	4%	10%	10%	49%		49%	51%	
			1	2	3	5	6	8	9	10	12	15			
			Predicted class												

Abb. 68: Verwechslungsmatrix des verwendeten Klassifikators der 10 wichtigsten Papierobjektklassen

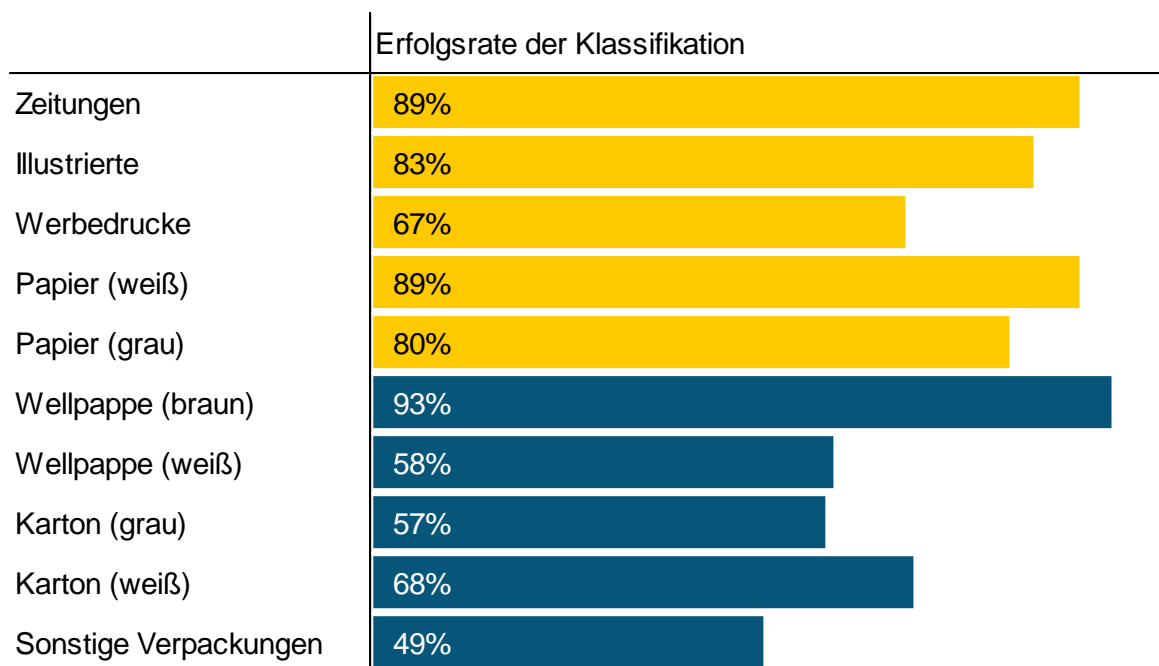


Abb. 69: Erfolgsrate der Klassifikation der 10 wichtigsten Papierobjektklassen zu Projektende

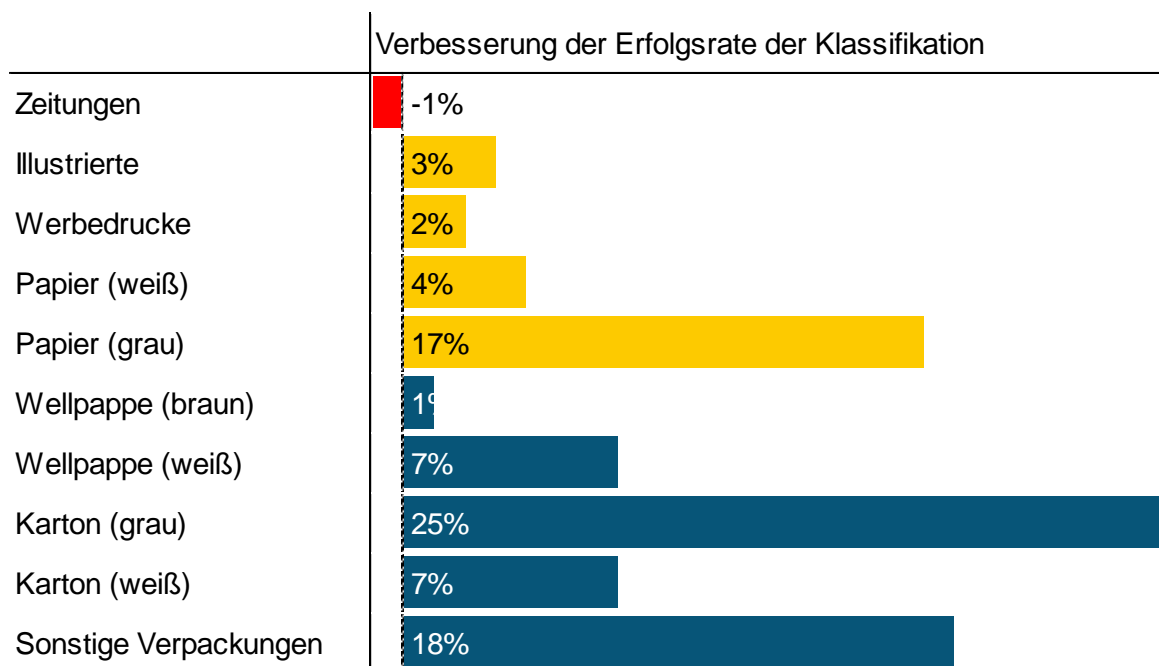


Abb. 70: Verbesserung der Erfolgsrate der Klassifikation der 10 wichtigsten Papierobjektklassen durch die im Projekt durchgeführten Maßnahmen

6. Wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

6.1. Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind für die KMU aus der Papierindustrie von großer Relevanz, da der Rohstoff Altpapier bei diesen Firmen etwa 70 % der variablen Kosten ausmacht. Die Ergebnisse des Projekts geben diesen Unternehmen die Möglichkeiten, mit dem Rohstoff Altpapier effizienter umzugehen, was für diese KMU existenziell sein kann.

Die KMU aus dem Altpapierhandel profitieren von den Ergebnissen dieser Studie, indem die Altpapiersorten der DIN EN 643, nach denen gehandelt und gezahlt wird, anhand objektiver Messwerte überprüfbar werden. Entsprechend lassen sich in den Sortieranlagen bessere Altpapierqualitäten generieren, was zu höheren Erlösen führt und somit die Wettbewerbsfähigkeit dieser KMU steigert.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Messsystem zur Analyse von Altpapierproben für die Anwendung im Laborbetrieb weiterentwickelt. Diese Arbeiten können als Grundlage für die Entwicklung von Altpapieranalyseanlagen für den industriellen Einsatz verwendet werden. An solchen Entwicklungen sind in der Regel KMU beteiligt. Unternehmensberater und KMU des Maschinenbaus können von den Forschungsergebnissen profitieren, da diese in den Bau solcher Anlagen involviert sind. Auch KMU aus dem Bereich Messtechnik werden von den Ergebnissen profitieren, da neue messtechnische Sensoren zur Bestückung der Analyseanlagen benötigt werden.

KMUs besitzen in der Regel nicht die finanziellen Mittel für große Prüfstände. Durch die Entwicklung des Messsystems im Technikum des Instituts steht für KMUs aus der Papierindustrie nun die Möglichkeit, Altpapierproben automatisch analysieren zu lassen.

6.2. Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse

Die Erkenntnisse aus der Studie zur Altpapierqualität können direkt umgesetzt werden. Mit Hilfe der gemessenen Daten wird ein aktuelles Bild der Altpapierqualität der am häufigsten in der Papierindustrie verarbeiteten Altpapiersorten aufgezeigt. Prozesse in der Altpapierverarbeitung können auf Grundlage dieser Erkenntnisse direkt angepasst werden.

Das Altpapiermesssystem kann als Grundlage für die Entwicklung von Altpapieranalyseanlagen für den industriellen Einsatz angesehen werden. Die Anlage ist als Demonstrator für die Machbarkeit solcher Systeme geeignet. Die Machbarkeit konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt werden. Für den industriellen Einsatz sind weitere Verbesserungen notwendig: Komponenten müssen besser aufeinander angepasst werden, um Störungen im Betrieb zu vermeiden und möglicherweise können andere Komponenten

ausgewählt werden, die einen größeren Durchsatz von Altpapier ermöglichen, um einen wirtschaftlicheren Betrieb der Anlage zu ermöglichen. Durchsatz und Wirtschaftlichkeit spielten im Rahmen des Forschungsprojekts nur eine untergeordnete Rolle, da die grundsätzliche Funktion und Machbarkeit der Anlage im Vordergrund stand.

6.3. Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse

Altpapier ist die wichtigste Rohstoffquelle in der deutschen Papierindustrie. Die möglichst genaue Kenntnis über die Qualität des eingesetzten Altpapiers ist für die altpapierverarbeitenden Unternehmen essentiell. Die gewonnenen Daten tragen daher dazu bei, dass Prozesse in der Verarbeitung von Altpapier angepasst und optimiert werden können. Unternehmen können diese Daten auch als Grundlage für Investitionen verwenden, um auf Entwicklungen im Bereich der Altpapierqualität zu reagieren.

Aufgrund der immer weiter geschlosseneren Recyclingkreisläufe ist es notwendig, Qualitätsparameter regelmäßig im Blick zu haben, um auf potenzielle Probleme reagieren zu können. Die vorliegende Studie gibt in diesem Zusammenhang zunächst Entwarnung, da keine dramatischen Einbrüche bei den gemessenen Qualitätsmerkmalen sichtbar wurden. Aber auch zukünftig wird es notwendig sein, diese Untersuchungsreihe fortzusetzen, da der Innovationsprozess bei den Papierprodukten die Altpapierqualität weiter beeinflussen wird und bei den Recyclingkreisläufen eine weitere Schließung zu erwarten ist.

7. Ergebnistransfer

Tab. 4 listet die in der Projektlaufzeit durchgeführten und Tab. 5 die nach der Projektlaufzeit geplanten Aktionen zum Ergebnistransfer des Projektes auf.

Tab. 4: Bisher durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel / Bemerkung	Ort / Rahmen	Zeitraum
Erstellung 1. Zwischenbericht	Fortschrittsbericht	Nachweis bZ	Januar 2017
PA-Sitzung im Rahmen des IGF-Tages	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse, Einbeziehung von sog. „Multiplikatoren“	PMV Darmstadt	30.03.2017
Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Festlegung & Absprache der ersten Arbeitspakete	Sitzung am PMV in Darmstadt	24.05.2017
Studentische Arbeit zur Problematik des Forschungsvorhabens	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden, Heranführen der Studierenden an wiss. Arbeiten	Advanced Design Project am PMV: „Konstruktion einer automatisierten Vereinzelung von Papierobjekten für ein Messsystem zur Altpapiercharakterisierung“	18.04.2017 – 06.06.2017
Bericht beim Ausschuss	Projektinformation für die Mitglieder	Technischer Ausschuss der VPWP in Hamburg	10.05.2017
Studentische Arbeit zur Problematik des Forschungsvorhabens	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden, Heranführen der Studierenden an wiss. Arbeiten	Masterarbeit am PMV: „Auswahl, Implementierung und Validierung eines Glanzsensors für ein Messsystem zur Klassifizierung von Altpapierobjekten“	03.05.2017 – 20.11.2017
Bericht beim Ausschuss	Projektinformation für die Mitglieder	Fachausschuss RECO in Ettringen	27.09.2017
Studentische Arbeit zur Problematik des Forschungsvorhabens	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und	Advanced Design Project am PMV: „Konstruktion und Umsetzung einer	23.10.2017 – 23.12.2017

	Methoden, Heranführen der Studierenden an wiss. Arbeiten	automatisierten Teilezuführung für ein Messsystem zur Altpapiercharakterisierung"	
Vortrag bei der Ingede Working Group zur Altpapierqualität	Bericht über den Projektfortschritt	Mainz-Kostheim	08.11.2017
Erstellung 2. Zwischenbericht	Fortschrittsbericht	Nachweis bZ	Januar 2018
PA-Sitzung im Rahmen des IGF-Tages	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse, Einbeziehung von sog. „Multiplikatoren“	PMV Darmstadt	08.03.2018
Poster und Kurzvortrag	Vorstellung von Forschungsergebnissen	European Cellulose Materials Doctoral Students Conference in Bratislava (Slowakei)	05.09.2018
Vortrag beim GespaRec-Workshop	Transfer von Forschungsergebnissen zum Thema „Aktuelle Daten und Trends zur Altpapierqualität der Sorten 1.02, 1.04 und 1.11“	Roermond (Niederlande)	19.09.2018
Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Besprechung erster Forschungsergebnisse	Sitzung am PMV in Darmstadt	05.12.2018
Erstellung 3. Zwischenbericht	Fortschrittsbericht	Nachweis bZ	Januar 2019
PA-Sitzung im Rahmen des IGF-Tages	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse, Einbeziehung von sog. „Multiplikatoren“	PMV Darmstadt	21.03.2019
Studentische Arbeit zur Problematik des Forschungsvorhabens	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden, Heranführen der Studierenden an wiss. Arbeiten	Advanced Design Project am PMV: „Weiterentwicklung eines Messsystems zur Bestimmung der Zusammensetzung von Altpapierproben“	25.03.2019 – 24.05.2019
Vortrag bei der Fachveranstaltung „Altpapier im Fokus“	Weiterbildung von Fachpersonal im Rahmen der Fachtagung	Dresden	15.05.2019
Vortrag beim APV-Sommerfest	Vorstellung der Forschungsergebnisse	PMV Darmstadt	24.05.2019

Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Besprechung aller Forschungsergebnisse	Sitzung am PMV in Darmstadt	27.06.2019
Studentische Arbeit zur Problematik des Forschungsvorhabens	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden, Heranführen der Studierenden an wiss. Arbeiten	Bachelorarbeit am PMV: „Anwendung von Hyperspektraldaten zur Klassifikation von Altpapierobjekten“	16.04.2019 – 17.07.2019
Vortrag beim PMV Altpapier Kolloquium	Vorstellung der Forschungsergebnisse	PMV Darmstadt	19.09.2019
Erstellung Abschlussbericht	Information des breiten Fachpublikums über Forschungsergebnisse	PMV Darmstadt	Oktober 2019

Tab. 5: Plan zum weiteren Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel / Bemerkung	Ort / Rahmen	Zeitraum
Vortrag beim Research Forum on Recycling	Vorstellung der Forschungsergebnisse	St. Louis (USA), TAPPI PEERS 2019	29.10.2019
Vortrag beim nächsten GespaRec-Workshop	Ergebnistransfer in Industrie und Wirtschaft	Fachvortrag zu den Forschungsergebnissen	2020
Veröffentlichung im Internet	Darstellung der Projektergebnisse	PMV / TUD Homepage	Ab 10/2019
Industrieberatung	Maßgeschneiderter Transfer an interessierte Formen und Personen	Weitergabe der im Forschungsvorgaben gewonnenen Erkenntnisse durch Beratungs- und Prüfungsleistungen des PMV Schulung von Consultants	Ab Ende 2019

8. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19118 N der Forschungsvereinigung „Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.“ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Unser Dank gilt weiterhin den Projektbegleitern aus der Industrie für deren Unterstützung.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

9. Literaturverzeichnis

1. **N.N.:** Papier 2019 - Ein Leistungsbericht. - Bonn, Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2019. -
2. **Beuth Verlag:** DIN EN 643: 2014, Papier und Pappe – Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten.
3. **Weinert, S. ; Ewald, C. ; Putz, H.-J.:** Investigation on Recovered Paper Quality in the INGEDE Member Countries : Final Report Ingede-Project 12608. - Darmstadt, Technische Universität, FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik, Bericht, 2011. - 114 S.
4. **Weinert, S. ; Putz, H.-J.:** Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapiersorten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen : Abschlußbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15408N. - Darmstadt, Technische Universität, FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik, Bericht, 2010. - 111 S.
5. **Putz, P. N. H.-J. ; Göttching, L.:** Zusammensetzung und Qualität von Altpapier in Abhängigkeit der regionalen und saisonalen Erfassung. - Darmstadt, Institut für Papierfabrikation, 2000.
6. **Wagner, J. ; Putz, H.-J. ; Schabel, S. ; Strunz, A.-M. ; Demel, I.:** Altpapierqualitätsbewertung - Potential der Sortiertechnik und ihre Auswirkung auf die Altpapierqualität : Abschlußbericht zum INFOR-Projekt 65R. - Darmstadt, Techn. Univ., FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik, Bericht, 2006. - 104 S.
7. **Renner, K. ; Putz, H.-J. ; Göttching, L.:** Wissenschaftliche Untersuchung und Begleitung von Modellversuchen zur getrennten Erfassung grafischer Altpapiere. - Darmstadt, IfP, 2000.
8. **Flamme, S.:** Altpapier - Bewertung der Qualitätskontrolle und Aufbau eines Qualitäts-Management-Systems. - Münster, IWARU, 2016.
9. **N.N.:** Papier 2013. Ein Leistungsbericht. - Bonn, Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), 2013.
10. **N.N.:** Scrap Specifications Circular 2013. - Washington, DC, ISRI - Institute of Scrap Recycling Industries, Inc., 2013.
11. **Anik, Y.:** Überführung des Sonderausschusses in einen Arbeitsausschuss. Dokument NA 074-02-03 AA N1538.
12. **Neukum, P. ; Putz, H.-J. ; Göttching, L.:** Zusammensetzung und Qualität von Altpapier in Abhängigkeit der regionalen und saisonalen Erfassung. - Institut für Papierfabrikation (IFP), Technische Universität Darmstadt, Schlussbericht AiF-Projekt 11420 N, 2000. - 115 S.
13. **N.N.:** CEPI Historic Statistics 1991-2013. - Brüssel, Confederation of the European Paper Industries (CEPI), 2014.
14. **Weinert, S. ; Hamm, U. ; Schabel, S.:** Stoffwertbeurteilung von Reststoffen der Papierindustrie im Emissionshandel. - Darmstadt, Technische Universität, FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik, Bericht, 2010. - 120 S.
15. **Jung, H. ; Kappen, J. ; Hesse, A. ; Götz, B.:** Wasser- und Rückstandsumfrage in der Deutschen Papier- und Zellstoffindustrie. - In: Aktuelle Papierrundschau. - (2015)01/2015. - S. 26-27.
16. **N.N.:** Papier 2015. Ein Leistungsbericht. - Bonn, Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), 2015.

17. **Seidemann, C. ; Malchin, M.:** Upgrading einer Fraktion in der Altpapiersortierung durch innovative ergänzende trockene Aufbereitungstechnologien. - Papiertechnische Stiftung, 2011.
18. **Pigorsch, E. ; Blasius, K. ; Hanecker, E.:** Bewertung des Einflusses der Altpapierqualität auf die Effizienz von Deinking-Anlagen als Basis für eine dynamische Optimierung. - Papiertechnische Stiftung, 2011.
19. **Faul, A. ; Hanecker, E.:** Veränderungen in den Qualitätseigenschaften von Altpapieren. - In: ipw. - (2007)- S. 54-58.
20. **TAPPI Press, Atlanta:** TAPPI 401 om-03, Fiber Analysis of paper and paperboard.
21. **Nellessen, B. ; Tolvanen, J.-P.:** Moderne Stickykontrolle in Papiermaschinen. - In: Wochenblatt für Papierfabrikation. - 138(2010)10. - S. 828-831.
22. **Gottschling, A. ; Putz, H.-J.:** Modellierung und systematische Bewertung von Altpapiersortieranlagen : Abschlußbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 17496N. - Darmstadt, Technische Universität, FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik, Bericht, 2015.
23. **Gottschling, A. ; Schabel, S.:** Pattern classification system for the automatic analysis of paper for recycling. - In: International Journal of Applied Pattern Recognition. - 3(2016)1. - S. 38-58.
24. **Zhang, Z.:** Microsoft kinect sensor and its effect. - In: IEEE multimedia. - 19(2012)2. - S. 4-10.
25. **Poke, F. S. ; Raymond, C. A.:** Predicting extractives, lignin, and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in Eucalyptus globulus. - In: Journal of Wood Chemistry and Technology. - 26(2006)2. - S. 187-199.
26. **Leitner, R. ; Rosskopf, S.:** Identification of flexographic-printed newspapers with NIR spectral imaging. - In: Int. J. Comput. Inf. Syst. Control. Eng. - 2(2008)8. - S. 68-73.
27. **Neimanis, R. ; Lennholm, H. ; Eriksson, R.:** Determination of moisture content in impregnated paper using near infrared spectroscopy. - In: 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 99CH36319), - IEEE, 1999. - S. 162-165. - ISBN 0780354141
28. **Stiebel, T. ; Bosling, M. ; Steffens, A. ; Pretz, T. ; Merhof, D.:** An Inspection System for Multi-Label Polymer Classification. - In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vol. 1, - IEEE, 2018. - S. 623-630. - ISBN 1538671085

10. Anhang

10.1. Bildanalysealgorithmen

Tabelle 1: Matlab-Quellcode von Bildanalysealgorithmus 1

```

1. function [mu, sig] = channelMeanSigma(img, channelNo, circular)
2. %CHANNELMEANSIGMA - Berechnet Mittelwert und Standardabweichung
3. %eines Kanals eines Fotos. Die Funktion Funktion kann daher z.B. dazu
4. %verwendet werden, die mittlere Farbtönsättigung und Standardabweichung eines
5. %Papierobjekts zu berechnen, indem ein HSV-Foto und die Kanalnummer
6. %2 für die Sättigungs-Kanal übergeben wird. Nullen werden als
7. %Hintergrund gewertet und daher nicht die Berechnung mit einbezogen
8. %
9. % Syntax: [mu, sig] = channelMeanSigma(img, channelNo)
10. %
11. % Inputs:
12. % img - Bild-Matrix der Form (Länge x Breite x Kanäle)
13. % channelNo - Nummer des zu verwendenden Kanals
14. %
15. % Outputs:
16. % mu - Mittelwert des Kanal
17. % sigma - Standardabweichung des Kanals
18. %
19. % Example:
20. % % Mittlere Farbtönsättigung berechnen:
21. % [mu, sig] = this.channelMeanSigma(this.imgHSV, 2)
22. %
23. %----- BEGIN CODE -----
24.     if (nargin < 3)
25.         channel = img(:,:,channelNo);
26.         channel(channel == 0) = NaN;
27.         mu = mean(channel(:),'omitnan');
28.         sig = std(channel(:),'omitnan');
29.     elseif (nargin == 3)
30.         channel = img(:,:,channelNo);
31.         vector = channel(:)*2*pi;
32.         vector(vector == 0) = [];
33.         mu = circ_mean(vector);
34.         sig = circ_std(vector);
35.     end
36.
37.
38. end

```

Tabelle 2: Matlab-Quellcode von Bildanalysealgorithmus 2

<pre> 1. function proportion = channelsInRangeProportion(img, varargin) 2. %CHANNELSINRANGEPROPORTION - Berechnet den Anteil der Pixel, die 3. %eine oder mehrere Bedingungen an die Kanäle erfüllen. So kann 4. %beispielweise der Anteil an weißen Pixeln bestimmt werden, indem 5. %ein HSV-Foto und einen Vektor mit dem Value-Kanal 3 mit dem 6. %Minimalwert 0.99 und dem Maximalwert 1 übergeben wird. Mehrere </pre>
--


```
7. %Bedingungen können durch mehrere solcher Vektoren gefordert
8. %werden.
9. %Nullen werden als Hintergrund gewertet und daher nicht die Berechnung mit
   einbezogen
10. %
11. % Syntax:  proportion = channelsInRangeProportion(img, varargin)
12. %
13. % Inputs:
14. %     img - Bild-Matrix der Form (Länge x Breite x Kanäle)
15. %     varargin - Vektoren der Form [Kanal minWert maxWert]
16. %
17. % Outputs:
18. %     proportion - Prozentualer Anteil der Pixel, die die
19. %     Bedingungen erfüllen
20. %
21. % Example:
22. %     % Anteil an weißen Pixeln berechnen
23. %     [mu, sig] = this.channelsInRangeProportion(this.imgHSV, [3, 0.99, 1])
24. %
25. %----- BEGIN CODE -----
26.     channel = [];
27.     minValue = [];
28.     maxValue = [];
29.
30.     for i = 2:nargin
31.         arg = varargin{ i-1 };
32.         id = length(channel) + 1;
33.         channel(id) = arg(1);
34.         minValue(id) = arg(2);
35.         maxValue(id) = arg(3);
36.     end
37.
38.     for i = 1:length(channel)
39.
40.         matrix = img(:, :, channel(i));
41.         mask = (matrix >= minValue(i)) .* (matrix <= maxValue(i));
42.         if (i == 1)
43.             totalMask = mask;
44.         else
45.             totalMask = totalMask .* mask;
46.         end
47.
48.     end
49.
50.
51.     pixel = sum(totalMask(:) == 1);
52.
53.     proportion = pixel / sum(matrix(:) ~= 0);
54.
55. end
```

10.2. Altpapiersortierkatalog

1 Zeitungen

Erkennungsmerkmale

- dünnes, leichtes Papier mit Graustich (vorwiegend aus Altpapier)
- meist nur ineinander gesteckt und gefaltet
- enthält journalistische Artikel

Beispiele

- Tageszeitungen
- Wochenzeitungen
- kostenlose Zeitungen

Zusätzliche Hinweise

Was ist mit Zeitungen, die noch mit Prospekten gefüllt sind?

Diese zerfallen vermutlich bei der Siebung. → Zeitungen und Prospekte getrennt analysieren.

Schnipsel von einzelnen Zeitungsseiten → Werbedruck



2 Illustrierte und Magazine

Erkennungsmerkmale

- Hefte mit meist hochwertigem, glattem, komplett bedrucktem Cover (Papier, kein Buchcover)
- sowohl geheftet als auch mit Kleberücken, niemals nur ineinander gelegt

Beispiele

- Zeitschriften
- Kataloge ohne festen Einband
- sehr hochwertige Firmen- und Produktbroschüren, die wie typische Zeitschriftenhefte aufgebaut sind



3 Werbedrucke

Erkennungsmerkmale

- enthält Beschreibungen von Waren und Dienstleistungen (Preise, kurze Schlagzeilen, ...)
- meist stark bedruckt (wenig Text, viele bunte Bilder)

Beispiele

- Werbeprospekte und Zeitungsbeilagen: u.a. Fresszettel von Discountern, Baumärkten, Möbelhäusern, Modefirmen
- Briefkastenwerbung, welche nicht in Briefumschlägen/ Versandtaschen versendet wird, u.a. ...
- Zeitungsähnlicher Werbedruck, wie Expert oder „Tip der Woche“
- Zeitungsähnliche Beilagen wie Prospekte, z.B. MediaMarkt, Expert
- (aufwendige) Flyer: u.a. Lieferdienste, Gutscheine (FastFood, etc.)
- Beilagen zu versendeten Katalogen, u.a. Bestellscheine, Rücksendeformulare
- Nicht eindeutig zuordnungsbare Einzelblätter von Magazinen
- Werbeprospekte, welche auch mit Katalogen mitgeliefert werden können, aber ein nur kurzzeitiges Zusatzangebot bewerben
- Broschüren



4 Bücher

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- Taschenbücher
- Bücher mit festem Einband
- Kataloge mit festem Einband
- Telefonbücher (nicht durchgefärbt)

Zusätzliche Hinweise

Auch Bücher mit fehlenden Buchdeckeln sind Bücher.



5 Weiße/helle Papiere

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

weiß/hell:

- Briefpapier, Schreibpapier und Druckpapier
- Kassenzettel
- Briefumschläge und Versandtaschen
- Gebrauchsanweisungen
- einfache gedruckte Flyer, wie Pastorenrundschriften
- Karteikarten
- Beipackzettel
- Schulheft
- Karteikarten



6 Graue/gelbliche Papiere

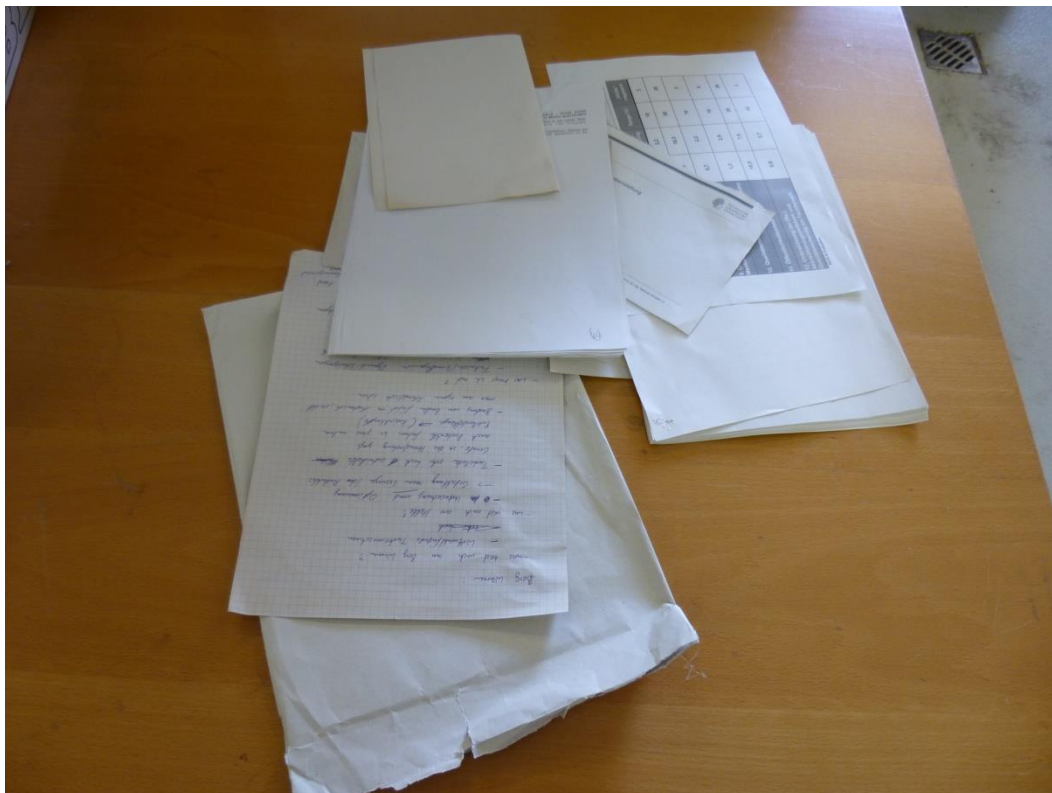
Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

grau/gelblich:

- Briefpapier, Schreibpapier und Druckpapier
- Kassenzettel
- Briefumschläge und Versandtaschen
- Gebrauchsanweisungen
- Einfache gedruckte Flyer, wie Pastorenrundschreiben
- Beipackzettel
- Karteikarten



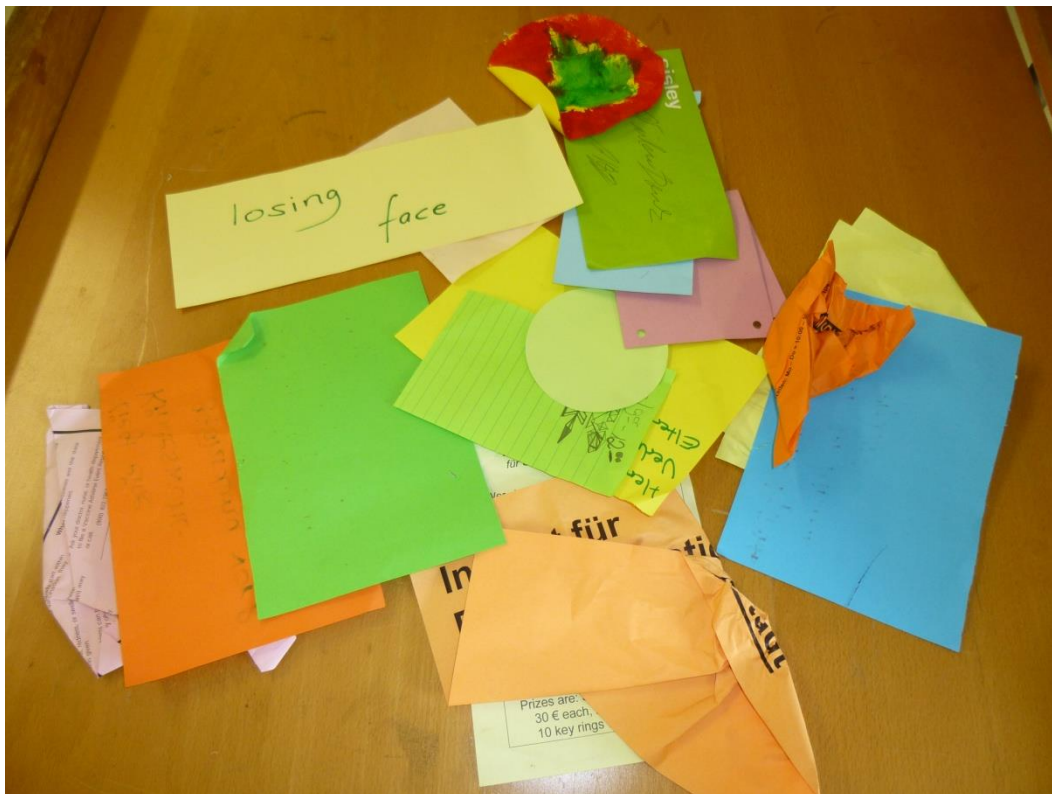
7 Gefärbte grafische Papiere

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- gefärbte Briefumschläge
- durchgefärbte Telefonbücher
- buntes Schreibpapier, Briefpapier und Druckpapier



8 Braune Wellpappe

Erkennungsmerkmale

- Wellpappe mit braunen/grauen Deckschichten

Beispiele

- Versandpäckchen/-pakete
- Obstfertigverpackungen
- Kratzschutzverpackung von Möbeln
- Verpackung schwerer Konsumgüter

Zusätzliche Hinweise

Es gibt Wellpappe mit sehr kleinen Wellen, die aber auf den ersten Blick wie Karton aussieht.



9 Weiße Wellpappe

Erkennungsmerkmale

- Wellpappe mit mindestens einer weißen Lage (weiß gedeckt und/oder gestrichen)

Beispiele

- Pizzakartons
- hochwertige Verpackung schwerer oder zerbrechlicher Konsumgüter
- Verpackungen von Pulverwaschmittel, Windeln etc.

Zusätzliche Hinweise

Es gibt Wellpappe mit sehr kleinen Wellen, die aber auf den ersten Blick wie Karton aussieht.



10 Grauer Karton

Erkennungsmerkmale

- mindestens eine Lage grau

Beispiele

- Faltschachteln für Lebensmittel, Konsumgüter
- Hülsen von Klopapier und Küchenrolle
- Karton für Rückwände von Blistern, Einlagen usw.
- Leere Aktenordner



11 Brauner Karton

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- braune/gefärbte Verpackungen (z.B. von Sixpacks braun, anderen Lebensmitteln)
- Schnellhefter und Karteikarten gefärbt



12 Weißer/heller Karton

Erkennungsmerkmale

- Faserstoff komplett weiß/gelb/hell

Beispiele

weiße/helle:

- Faltschachteln für Medikamente,
- Lebensmittel, Zigaretten
- Preisanhänger?
-



13 Feste Hülsen

Erkennungsmerkmale

- größere Wandstärke als bei Klo- und Küchenpapierrollen
- meist braun

Beispiele

- Hülsen von Alufolie
-



14 Faserguss

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- Eierkartons
- Faserformteile für Verpackungszwecke



15 Sonstige Verpackungspapiere

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- Tüten, Tragetaschen, Papiersäcke
- Lebensmittelbeutel (unverschmutzt)
- Packpapier
- Teebeutelhüllen
- Geschenkpapier
- braune Briefumschläge
- Polstermaterial



16 Hygienepapiere

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- Papiertaschentücher
- Papierhandtücher
- Küchenkrepp
- Servietten



17 Stark verschmutzte Papiere

Erkennungsmerkmale

- Papier/Pappe/Karton mit anorganischen und/oder organischen Stoffen stark verschmutzt
- oft Klumpen undefinierbarer Zusammensetzung

Beispiele

- ---

18 Sonstige ungeeignete Papiere

Erkennungsmerkmale

- Papier/ Pappe/ Karton, die für das Recycling ungeeignet sind

Beispiele

- Tapeten
- Silikonpapier
- Backpapier
- Trägerpapier von Aufklebern
- Fotos
- Getränkekartons
- eindeutig gewachste oder nassfeste Papiere/Pappen/Karton
- Pappmaché

19 Papierfremde Stoffe

Erkennungsmerkmale

- ---

Beispiele

- Windeln, Damenbinden
- Kunststoffe
- Holz
- Textilien
- Steine
- Metall
- Glas

20 Gemischte Objekte

Erkennungsmerkmale

- Objekt besteht aus Teilen verschiedener Objektklassen
- nicht einfach mechanisch aufzutrennen, d. h. in Sortieranlage nicht auftrennbar
- Verbund oder Konglomerat aus Teilen verschiedener Objektklassen

Beispiele

- gefüllte Kisten
- fest ineinandergesteckte/ verknüllte Objekte verschiedener Objektklassen
- miteinander verklebte/ geheftete Objekte verschiedener Objektklassen
- nicht-geöffnete Objekte verschiedener Objektklassen

