

Schlussbericht vom 29.09.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 21104 N

Thema

Bauteil-Identifizierung zur Einzelteilverfolgung anhand fluoreszierender Additive in Kunststoffbauteilen ("BIANKA")

Berichtszeitraum

01.04.2020 – 31.03.2022

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
Allmandring 9B
70569 Stuttgart

SKZ - KFE gGmbH (im folgenden Bericht als „SKZ“)
Friedrich Bergius-Ring 22
97076 Würzburg

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Projektsteckbrief.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung.....	2
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Bauteilrückverfolgung	6
2.2 Compoundieren.....	9
3 Durchgeführte Arbeiten	11
3.1 Materialauswahl.....	11
3.2 Compoundherstellungen	12
3.3 Vorarbeiten am Minilab.....	14
3.4 Spritzgießen	16
3.5 Materialcharakterisierung	17
3.6 Additive Fertigung	18
3.7 Auslegung der Hardware	18
3.8 Identifikationsalgorithmus	21
3.9 Identifikationstests	22
3.10 MID-Prozesskette	23
4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	25
4.1 Materialien und Bauteile.....	25
4.1.1 Compoundieren	25
4.1.2 Vorversuche am Minilab	26
4.1.3 Spritzgießen.....	28
4.2 Materialcharakterisierung	31
4.3 Hardwaresystem.....	34
4.4 Identifikationsalgorithmus	36
4.4.1 Aufbau des Programms	36

4.4.2	Bildvorverarbeitung	37
4.4.3	Beschreibungsvektor	39
4.4.4	Vergleich der Beschreibungsvektoren	40
4.5	Identifikationstests	41
4.5.1	Identifikation unprozessierter Bauteile	42
4.5.2	Identifikation nach Oberflächenveränderung	46
4.5.3	Traceability in der MID-Prozesskette	48
5	Zusammenfassung.....	50
6	Umsetzung der Forschungsergebnisse	51
6.1	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	51
7	Verwendung der Zuwendung.....	53
7.1	Hahn-Schickard.....	53
7.1.1	Zuwendung	53
7.1.2	Wissenschaftlich-technisches Personal.....	53
	(Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	53
7.2	SKZ	53
7.2.1	Zuwendung	53
7.2.2	Wissenschaftlich-technisches Personal.....	53
	(Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	53
7.2.3	Geräte.....	54
	(Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	54
7.2.4	Leistungen Dritter	54
	(Einzelansatz C des Finanzierungsplans)	54
8	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU und Angaben zur Finanzierbarkeit	55
9	Literaturverzeichnis.....	57

Abkürzungsverzeichnis

v	Varianz
CaCO ₃	Kalziumkarbonat
DMC	Data-Matrix-Code
DSC	Differential Scanning Calorimetry (dynamische Differenzkalorimetrie)
FET	Feed Enhancement Technology
ID	Identification
K	Kelvin
LED	Light-Emitting Diode
MID	Molded Interconnected Device
PA12	Polyamid 12 (Poly-Laurylactam)
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PPA	Polyphthalamid
PUF	Physical Unclonable Function
RFID	Radio-Frequency Identification
RoI	Region of Interest
s	Streuung
Sr(OH) ₂	Strontiumhydroxid
SrO	Strontiumoxid
T&T	Track & Trace
TGA	Thermogravimetrische Analyse
\bar{x}	Arithmetisches Mittel
z. B.	zum Beispiel
Gew.%	Gewichtsprozent Gewichtsprozent
UV	Ultraviolettstrahlung Ultraviolett
PA	Projektbegleitender Ausschuss
ppm	parts per million
mW	Milliwatt

d_{50}	Partikelgröße, die einen Durchgangssummenwert von 50 % aufweist
E_{mod}	E-Modul,
σ_M	maximale Biegespannung
ε_M	Biegedehnung bei maximaler Biegespannung
J / kJ	Joule / Kilojoule
ΔH_m	Schmelzenthalpie

Projektsteckbrief

Dieses Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Detektion fluoreszierender Partikel in spritzgegossenen Kunststoffbauteilen für eine äußerlich oder durch zusätzlich angebrachte Systeme „markierungsfreie“ Bauteilrückverfolgung. Für die Untersuchungen wurden Kunststoffcompounds und unterschiedliche reine Kunststoffe wie klassische Polyolefine oder laser-strukturierfähigem Polyphthalamid mit den fluoreszierenden Partikeln hergestellt und anschließend mittels Spritzgießprozess zu Probekörpern verarbeitet. Die Detektion der entstehenden Partikelwolke erfolgte durch Anregung mit UV-Strahlung und einem Kamerasystem zur fotografischen Aufnahme der Bauteiloberfläche. Das entstehende Bild wurde mit einem speziell entwickelten Algorithmus ausgewertet, um die bauteilspezifischen Informationen zu erfassen und das Bauteil bei einem erneuten Scan zuverlässig zu identifizieren. Auch bei Verunreinigungen und Kratzern auf der Oberfläche konnten Teile zuverlässig identifiziert werden. Mit dieser Technologie wurde eine sichere und vollständige Rückverfolgung der Produkte und eine vollständige werkstoffliche Weiterverwendung ermöglicht.

AiF/IGF-Projekt *Projektnummer: 21104 N*

„Bauteil-Identifizierung zur Einzelteilverfolgung anhand fluoreszierender Additive in Kunststoffbauteilen ("BIANKA")“

Dauer: 01.04.2020 – 31.03.2022

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

- Apium Additive Technologies GmbH
- Balluff GmbH
- Coperion GmbH
- Detagto GmbH
- Dr. Boy GmbH & Co. KG
- fischerwerke GmbH & Co. KG
- Gabriel-Chemie Gesellschaft m.b.H.
- GRAFE Advanced Polymers GmbH
- hema electronic GmbH
- Herz GmbH
- innoscripta GmbH
- Litec-LLL GmbH
- motan holding gmbh
- Omya International AG

1 Einleitung

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Die Einzelteilverfolgung in der industriellen Fertigung bietet im Kontext der fortschreitenden Sensorisierung und Digitalisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette einen stetig wachsenden wirtschaftlichen Mehrwert. Jedem einzelnen Bauteil können dabei individuelle Daten zugeordnet werden, die bspw. Herstellungsparameter, Umweltbedingungen, Qualitätsdaten sowie Standort und Personalinformationen umfassen. Anhand der aufgenommenen Daten können unter anderem Arbeitsabläufe effizienter gestaltet werden, Fertigungsprozesse können auf Basis von Qualitätsdaten optimiert werden und im Fall von Regressforderungen können Maßnahmen eingeleitet werden, die nur auf betroffene Produkte ausgerichtet sind. Insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen, zum Beispiel in der Automobilindustrie, der Luftfahrt oder der Medizintechnik, besitzt die lückenlose Einzelteilverfolgung einen hohen Stellenwert und wird vielerorts bereits angewandt. Bei Lebensmitteln ist eine Rückverfolgung über die gesamte Produktions- und Vertriebskette sogar gesetzlich vorgeschrieben [1]. Neben den bestehenden Vorteilen gewinnt die Einzelteilverfolgung durch Entwicklungen im Zuge von „Industrie 4.0“ und „Smart Manufacturing“ noch weiter an Bedeutung. Einerseits nimmt die individuelle Unterscheidung von Bauteilen und Komponenten bei der Massenproduktion individualisierter Produkte eine tragende Rolle ein. Andererseits lassen sich durch eine Einzelteilverfolgung Prozess- und Qualitätsdaten miteinander verknüpfen. In der Produktion der Zukunft ermitteln intelligente, vernetzte Maschinen daraus Zusammenhänge und optimieren Prozesseinstellungen, Bauteilpaarungen und Produktionsparameter selbstständig.

1.2 Problemstellung

Konventionelle, etablierte Verfahren zur Einzelteilverfolgung wie Seriennummer, Barcode, Data-Matrix-Code (DMC) oder RFID lassen sich in vielen Fällen anwenden. Die Bauteilgröße, Markierungskosten, optische oder hygienische Bedingungen sind jedoch nur einige Beispiele, die eine herkömmliche Track & Trace-Lösung (T&T-Lösung) verhindern können.

Ein vielversprechender Ansatz ist daher die Identifizierung von einzelnen Objekten auf Basis individueller Oberflächenstrukturen. Dabei handelt es sich – im Gegensatz zu konventionellen T&T-Verfahren – um einen fälschungssicheren Ansatz. Zudem ist die Rückverfolgung von Objekten möglich, bei denen keine Beschriftung oder das Aufbringen eines RFID-Tags möglich ist. Bei Schüttgut, z. B. bei kleinen Kunststoffbauteilen, ist darüber hinaus eine einfache Rückverfolgung bereits ab Beginn der Prozesskette möglich. Ausführliche Versuche im Rahmen des BMBF-Projekts „Track4Quality“ [2] zeigen jedoch, dass die Identifizierung anhand vorhandener Oberflächenstrukturen maßgeblich vom Material abhängt. Gerade bei Kunststoffbauteilen ist dies aufgrund der großen Materialvielfalt ein Problem. Zudem können Oberflächenstrukturen des Spritzgießwerkzeugs auf der Bauteiloberfläche repliziert werden, was zwar eine Chargenerkennung ermöglicht, eine Einzelteilidentifizierung hingegen nicht [2].

Die Arbeiten von Hahn-Schickard Stuttgart im Rahmen des Projekts Track4Quality und die daraus entstandenen Gespräche mit Unternehmen unterstreichen, dass trotz bestehender, etablierter T&T-Verfahren ein großer Bedarf an ergänzenden T&T-Technologien existiert, welche die wesentlichen Nachteile der bisherigen Methoden adressieren. Diese „äußerlich markierungsfreie“ Bauteilidentifizierung anhand inhärenter Oberflächenstrukturen löst diese weitestgehend und stellt daher einen vielversprechenden Ansatz dar. Dennoch verhindert die Materialvielfalt bei Kunststoffen und die Abformung der Werkzeugoberfläche, ein universell einsetzbares System zur markierungsfreien Einzelteilverfolgung zu realisieren. Vielmehr ist bei nahezu jeder Bauteilkategorie, bei der Verwendung eines neuen Materials oder bei einer Änderung des Spritzgießwerkzeugs eine neue Machbarkeitsstudie sowie die Anpassung des T&T-Systems notwendig.

1.3 Zielsetzung

Ziel des Projektvorhabens war es, ein innovatives, universell einsetzbares T&T-Verfahren für Kunststoffbauteile zu entwickeln, welches im Wesentlichen die gleichen

Vorzüge bietet wie die markierungsfreie Einzelteilverfolgung, jedoch auf beliebige thermoplastische Kunststoffe anwendbar ist. Das Verfahren basiert auf fluoreszierenden Additiven, die Kunststoffen – ähnlich wie Farbpigmente – in geringer Konzentration beigemischt werden. Durch die statistische Verteilung der Fluoreszenzpartikel beim Herstellungsprozess wird eine individuelle Partikelverteilung an der Oberfläche erreicht, was in Abbildung 1 am Beispiel eines MID schematisch dargestellt ist. Die Partikelverteilung ist unter normalen Bedingungen unsichtbar und kann mit Hilfe einer UV-Beleuchtung sichtbar gemacht werden. Die Additive haben aufgrund der geringen Konzentration einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Eigenschaften des Trägerkunststoffs (zum Beispiel im Hinblick auf reduzierte Bruchdehnung oder Schlagzähigkeit). Ein solches Verfahren kann ebenso wie die markierungsfreie Einzelteilverfolgung bei Bauteilen zum Einsatz kommen, bei denen konventionelle Verfahren nicht anwendbar sind. Zudem besitzen derartige Kunststoffobjekte bereits unmittelbar nach der Herstellung ein individuelles Fluoreszenzpartikelmuster, wodurch die Einzelteilverfolgung ab dem ersten Prozessschritt möglich ist. Weiterhin lässt sich beim Herstellungsprozess eines Bauteils das resultierende Partikelmuster nicht gezielt beeinflussen. Damit ist ein individuelles Partikelmuster nicht kopierbar, sodass Bauteile dadurch fälschungssicher sind.

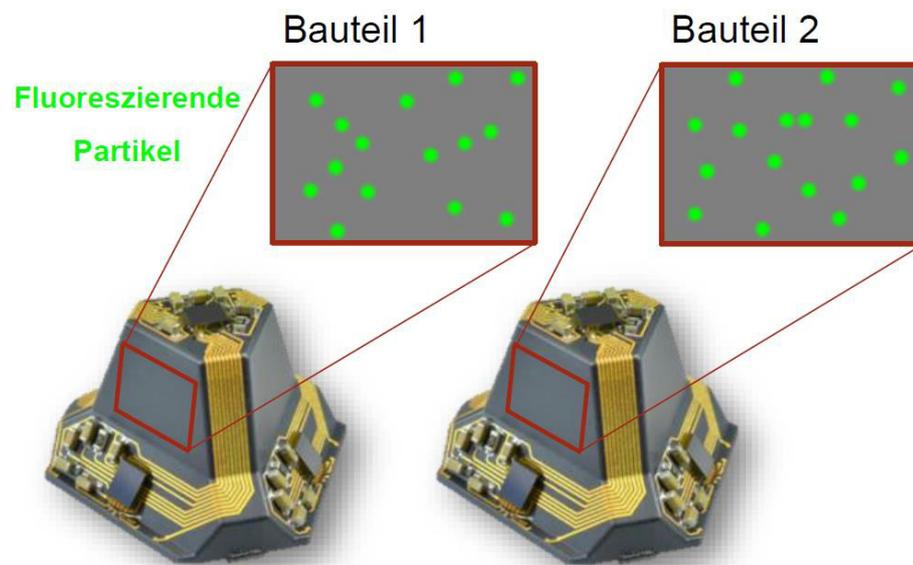


Abbildung 1: Projektidee zur Identifizierung von spritzgegossenen Schaltungsträgern (MID): Makroskopische gleiche Bauteile unterscheiden sich durch die individuelle Verteilung von fluoreszierenden Additivpartikeln, die unter UV-Beleuchtung sichtbar gemacht werden können. Die geometrische Form der Partikel kann variieren.

Wissenschaftlich-technische Problemstellung:

Durch die Neuheit des Verfahrens gilt es zuerst, geeignete Additive oder geeignete Klassen von Additiven zu identifizieren. Die Additive sollen dabei einen vernachlässigbaren Einfluss auf die sonstigen Eigenschaften des Basispolymers/Trägerkunststoffs haben. Die Volumenkonzentration der Additive darf daher nicht zu hoch sein. Die Konzentration der Additive muss jedoch gleichzeitig genügend hoch sein, um unter UV-Beleuchtung individuelle Partikelmuster an der Oberfläche sichtbar zu machen. Ein wesentliches Ziel des Projekts ist dementsprechend die Entwicklung eines Masterbatches, das den Thermoplasten bei der Verarbeitung hinzugefügt werden kann. Im Zuge der Entwicklung wird für Anwender ein Regelheft zur Verarbeitung des Masterbatches erstellt. Zur Aufnahme der individuellen Partikelmuster ist die Entwicklung eines Kameraaufbaus mit UV-Beleuchtung notwendig, der auf Kunststoffbauteile unabhängig von Bauteilgröße, Bauteilgeometrie oder Farbe anwendbar ist. Mit Blick auf die Einzelteilverfolgung in der Fertigung ist die Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus vorgesehen, der Bauteile durch den Vergleich von Partikelmustern schnell und zuverlässig identifiziert. Zur Beschleunigung der Identifizierung werden die aufgenommenen Bilddaten auf die wesentliche Information des Partikelmusters komprimiert, sodass ebenso der Speicherplatzbedarf der abgespeicherten Bilddaten auch bei großen Stückzahlen (> 100.000 Stück) kein Problem darstellen sollte. Das Gesamtsystem muss letztlich die Zuverlässigkeit der Identifizierung gewährleisten, wobei im Rahmen des Projekts eine maximale Fehlerquote im ppm-Bereich erreicht werden soll. Darüber hinaus wird die Robustheit der Identifizierung gegenüber prozess- und nutzungsspezifischen Oberflächenveränderungen gefordert, um das System in der industriellen Fertigung einsetzen zu können.

Wirtschaftliche Problemstellung: Aufgrund der wirtschaftlichen Vorteile in der Produktion, der voranschreitenden Digitalisierung sowie Entwicklungen im Zuge von Industrie 4.0 besteht ein branchenübergreifender Bedarf an möglichst universellen und fälschungssicheren T&T-Verfahren für Kunststoffkomponenten, um die Wettbewerbsfähigkeit des eigenen Unternehmens mittel- und langfristig zu sichern. Daneben richten Produktfälschungen allein in Deutschland jährlich einen Schaden von über 50 Milliarden Euro an [3]. Konventionelle Beschriftungs-Verfahren sowie RFID sind jedoch anfällig gegenüber Fälschungen und zudem bei einigen Produkten nicht anwendbar oder unwirtschaftlich. Nicht nur in sicherheitsrelevanten Branchen besteht

daher ein Bedarf an ergänzenden Verfahren zur Einzelteilverfolgung in der Produktion. Ein solches System muss im Prozesstakt vorhandener Fertigungsanlagen funktionieren und darf nur geringe Initialkosten und laufende Kosten verursachen.

Durch die Neuheit des Verfahrens beinhaltet das Forschungsvorhaben umfangreiche Fragestellungen, deren Erforschung mit hohen Kosten verbunden sind. Zudem würde die Durchführung der oben erwähnten Versuche zur Robustheit und Zuverlässigkeit der Identifizierung in der laufenden Fertigung zwangsläufig zu Stillstandzeiten von Produktionsanlagen führen. Die Umsetzung des Vorhabens ist daher insbesondere für KMU nur durch die Unterstützung von Forschungsinstituten zu schaffen, wobei die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen die Erarbeitung des T&T-Verfahrens im Rahmen eines geförderten Projekts notwendig machen.

2 Stand der Technik

2.1 Bauteilrückverfolgung

Das angestrebte T&T-Verfahren basiert auf Erkenntnissen sowie Entwicklungen aus verschiedenen Forschungs- und Anwendungs-Bereichen:

Etablierte T&T-Verfahren: Die Rückverfolgung von Chargen oder einzelnen Objekten ist in der industriellen Fertigung bereits weit verbreitet. Dazu wird das Objekt durch Aufbringen einer Beschriftung oder eines RFID-Tags, auf dem eine ID gespeichert ist, gekennzeichnet. Bei den etablierten T&T-Verfahren ist die Forschungsarbeit weitestgehend abgeschlossen. Einige Firmen haben sich jedoch auf die Anpassung oder Weiterentwicklung der etablierten Verfahren spezialisiert, sofern gewisse Bauteile spezielle Eigenschaften und Anforderungen besitzen.

Physical Unclonable Function (PUF): Baugleiche Objekte können aufgrund von geringfügigen, zufälligen und nicht kontrollierbaren Schwankungen im Produktionsprozess (marginal) unterschiedliche Eigenschaften besitzen, die zur Authentifizierung oder Identifizierung eines Objekts genutzt werden können. Man spricht dabei von einer „Physical Unclonable Function“ (PUF). PUF werden häufig als Sicherheitselement von integrierten Schaltungen eingesetzt. Vorhabenbezogene Beispiele einer PUF basieren meist darauf, dass ein individuelles Muster gezielt hergestellt wird, um ein Objekt damit zu versehen:

- Aufbringen von Gold-Nanopartikeln, die sich zufällig auf einer Objektoberfläche verteilen. Die Positionen der kugelförmigen Partikel sind einzigartig und können zur Objektauthentifizierung und Objektidentifizierung genutzt werden. [4]
- Aufbringen einer Beschichtung, die mikroskopisch kleine Drähte enthält. Dabei handelt es sich um Silber-Drähte, die mit einer Fluoreszenz-Schicht beschichtet wurden. Die zufälligen Positionen und Orientierungen der Drähte führen zu einem individuellen Muster bei einzelnen Bauteilen. [5]
- Einbringen von fluoreszierenden Partikeln in Papier. Die individuelle Verteilung der Fluoreszenzpartikel wird aufgenommen und durch einen Algorithmus in einen Data-Matrix-Code (DMC) überführt. Der DMC wird auf dem Papier aufgedruckt, um dadurch z. B. Tickets oder Verpackungen oder andere Schriftstücke fälschungssicher zu machen. [6]

Markierungsfreie Einzelteilverfolgung durch Oberflächenstrukturen: Einige Objekte besitzen bereits ohne zusätzliche Markierung inhärente, individuelle Oberflächenstrukturen, die als PUF zur Identifizierung einzelner Objekte genutzt werden können. Die Einzigartigkeit derartiger Strukturen wurde zuerst an Papier demonstriert [7]. Für manche Kunststoffmaterialien wurden zwar ebenfalls einzigartige Oberflächenstrukturen nachgewiesen [2], [8]. Allerdings ist die Identifizierbarkeit von Kunststoffobjekten maßgeblich vom Material sowie vom verwendeten Spritzgießwerkzeug abhängig, was eine Einzelteilerkennung in vielen Fällen unmöglich macht [2]. In [2], [8] wurden die Oberflächenstrukturen der Testobjekte mit einem einfachen Kameraaufbau, bestehend aus kommerziell verfügbaren Komponenten, fotografiert. In [8], [9] werden Bildverarbeitungs-Algorithmen vorgestellt, die zur Identifizierung von Kunststoffbauteilen eingesetzt werden.

Fluoreszenz-Marker in Kunststoffobjekten: Es existieren bereits Kunststoff-Compounds am Markt, die fluoreszierende Partikel beinhalten. Die in solchen Kunststoffen enthaltenen Additive lassen sich über das charakteristische Fluoreszenzspektrum und/oder die Abklingzeit unterscheiden, sodass die Compounds zur Materialsortierung oder zum Fälschungsschutz von Kunststoffbauteilen dienen [10]. Eine Einzelteilverfolgung ist jedoch nicht möglich. Meist ist die Volumenkonzentration in solchen Kunststoffobjekten so hoch, dass der gesamte Kunststoffkörper unter entsprechender Beleuchtung fluoresziert. Es gibt jedoch Beispielaufnahmen in der Literatur, die unterscheidbare Fluoreszenzpartikel an der Oberfläche eines Bauteils zeigen (siehe Abbildung 2).

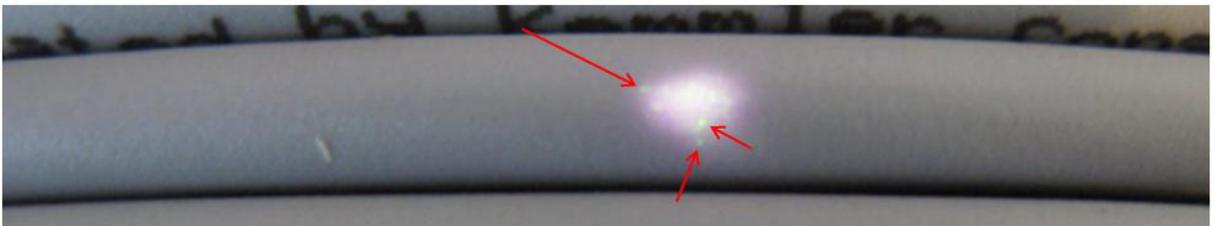


Abbildung 2: Kunststoffisolation eines Kabels, wobei im Kunststoff fluoreszierende Partikel eingebracht wurden. Die (unterscheidbaren) Partikel sind unter UV-Beleuchtung an der Oberfläche sichtbar. Die Partikel werden aufgrund ihres charakteristischen Fluoreszenzspektrums und Nachleuchtverhaltens zum Fälschungsschutz von Objekten eingesetzt. [10]

Die Grafe Advanced Polymers GmbH, die sich im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) am Projekt beteiligt, bietet bereits ein Masterbatch mit Fluoreszenzmarkern an. Die Fluoreszenzpartikel können bei niedriger Dosierung durch

einen Lichtimpuls erkennbar gemacht werden. Zudem ist eine Anwendung in allen thermoplastischen Kunststoffen möglich, ohne dass zusätzliche Hilfsstoffe oder Prozessschritte erforderlich sind. Darüber hinaus wird die Funktionalität der Fluoreszenzpartikel nicht durch zusätzliche Stoffe, wie z. B. Füllstoffe oder Farbstoffe beeinträchtigt. Ebenso wird das Endprodukt hinsichtlich mechanischer Eigenschaften oder Farbgebung nicht signifikant beeinflusst. [11]

Im BMBF-Forschungsvorhaben „ControlPlus“ [12], an dem Hahn-Schickard ebenfalls beteiligt ist, soll mit Hilfe von Fluoreszenzpartikeln der Polysecure GmbH die Einzelteilverfolgung bei diagnostischen Testträgern gesichert werden. Im Gegensatz zum Vorhaben „ControlPlus“ steht beim Forschungsvorhaben „Bianka“ die Entwicklung eines universell einsetzbaren Systems zur Einzelteilverfolgung beliebiger Kunststoffkomponenten im Mittelpunkt. Dadurch können sowohl im Hinblick auf die Auswahl der fluoreszierenden Additive als auch bei der Auslegung der Hardware und der Algorithmen die Anforderungen und Bedürfnisse der kunststoffverarbeitenden Branche insgesamt berücksichtigt werden. Zudem wird im Vorhaben „Bianka“ gezielt die Robustheit des Verfahrens untersucht, indem unter anderem verschiedenste charakteristische Umwelt- und Produktionsbedingungen simuliert werden.

Neben den kürzlich begonnenen Forschungsarbeiten im Projekt „ControlPlus“ gibt es nach aktuellem Stand keine Forschungsarbeiten und kein bestehendes Verfahren, durch das Kunststoffobjekte mit Hilfe von Fluoreszenzmarkern individuell unterschieden werden können. Daher hat Hahn-Schickard bereits im Vorfeld der Projektbeantragung eine Patentanmeldung [13] beim Deutschen Patentamt eingereicht, wodurch die Bearbeitung des Themas schutzrechtlich gesichert werden soll.

2.2 Compoundieren

In der industriellen Praxis ist der Einsatz von gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextrudern zur Aufbereitung von Compounds am weitesten verbreitet. Der schematische Aufbau einer Compoundieranlage ist in Abbildung 3 dargestellt.

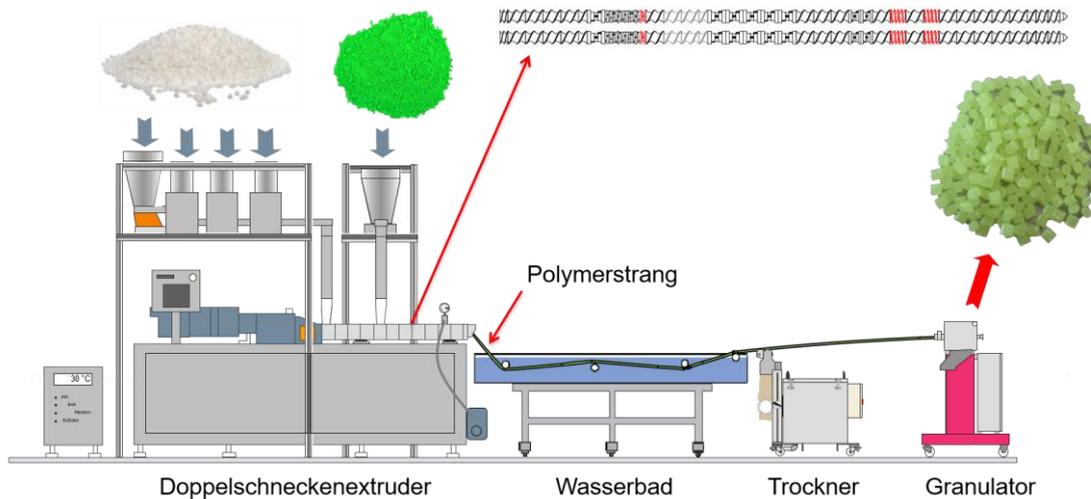


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Compoundieranlage zur Herstellung von fluoreszenzmarkergefüllten Compounds.

Das Kernstück der Compoundieranlage ist der Extruder, in dem zwei baugleiche, symmetrisch angeordnete Schnecken mit gleicher Drehzahl betrieben werden. Die Schnecke kann an die Anforderungen des zu verarbeitenden Materials angepasst werden und mit unterschiedlichen Schneckenelementen wie Fördererelementen, Knetblöcken, Zahnmischelementen oder Schneckenmischelementen (dichtkämmend oder nicht dichtkämmend – je nach Anforderung an die Mischaufgabe) variabel aufgebaut werden. Fördererelemente haben die Aufgabe, das Material im Zylinder zu transportieren. Der Einsatz von Knetblöcken, Zahnmischelementen und Schneckenmischelementen hingegen bewirken eine Plastifizierung des Polymers und eine dispersive bzw. distributive Durchmischung der Füllstoffe/Additive in der Polymerschmelze. Die Vorteile von gleichläufigen Doppelschneckenextrudern zur Aufarbeitung von Compounds liegen zum einen darin, dass die Schnecke modular aufgebaut und so an die jeweilige Compoundieraufgabe angepasst werden kann. Zum anderen kann durch den Einsatz spezieller Knetelemente eine gute Mischwirkung und somit eine gute Einarbeitung von Additiven erzeugt werden. Weiterhin besitzt der Doppelschneckenextruder eine hohe Entgasungsoberfläche, wodurch er sehr gut für Entgasungsprozesse geeignet ist.

Die Hauptbestandteile einer Rezeptur werden bei Bedarf vorgemischt oder mittels separater Dosierwaagen über den Haupteinzug auf den Doppelschneckenextruder gegeben. Die Zugabe sensitiver Additive erfolgt in der Regel gravimetrisch über eine oder mehrere Seitenbeschickungen, deren Zugabeort variabel gestaltet werden kann. Generell ist zu beachten, dass zur erfolgreichen Dispergierung der Additive in der Matrix Scherenergie in das Material eingetragen werden muss. Daher muss ein Kompromiss zwischen optimaler Verteilung und geringer Materialschädigung gefunden werden. Ansätze zur Lösung dieses Zielkonflikts liegen beispielsweise in der Optimierung der Schneckenkonfiguration sowie der Variation der Zugabestelle für die Additive. Im Anschluss wird der extrudierte Schmelzestrang granuliert. Im Falle des Kaltgranulierungsverfahrens durchläuft der Schmelzestrang zur Kühlung ein Wasserbad mit nachgeschalteter Absaugung grober Feuchte. Im Granulator wird der Strang gefördert und in zylindrische Granulatkörner zerkleinert und steht dann als Rohstoff für Folgeprozesse zur Verfügung.

3 Durchgeführte Arbeiten

3.1 Materialauswahl

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Polymere und Fluoreszenzmarker verwendet. In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde sich darauf geeinigt, dass für eine erste Machbarkeit die günstigen Massenkunststoffe Polyethylen und Polypropylen verwendet werden. Das Anwendungsgebiet der Bauteilrückverfolgung zielt auf sicherheitsrelevante Bauteile oder technische Bauteile ab, für die häufig keine Massenkunststoffe aus dem Bereich der Polyolefine verwendet werden, sondern technische Kunststoffe wie etwa Polyamid. Daher wurden diese Kunststofftypen im weiteren Verlauf des Projektes nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss berücksichtigt. Für die Erzeugung des gewünschten Fluoreszenzeffektes mit statistisch verteilten Partikeln im Material wurden anorganische Partikel festgelegt. Zum einen weisen diese eine hohe Temperaturstabilität auf, was hinsichtlich der Verarbeitungstemperaturen von Kunststoffen relevant ist. Zum anderen wurde davon ausgegangen, dass anorganische Partikel bei einer geringen Konzentration den für dieses Projektvorhaben erforderlichen „Sternenhimmel“ auf der Materialoberfläche erzeugen. Demgegenüber stehen organische Fluoreszenzmaterialien, die sich bei der Verarbeitung im Kunststoff gleichmäßig verteilen und dadurch eine flächendeckende Fluoreszenz verursachen. Bei der Verwendung anorganischer Fluoreszenzmarker ist zu beachten, dass diese häufig basisch wirken und bei Polykondensaten eine basenkatalysierte Hydrolyse verursachen können. Daher wurden für technische Polymere inerte Fluoreszenzmarker verwendet. Eine Übersicht aller verwendeten Materialien ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der im Projekt verwendeten Materialien zur Herstellung fluoreszierender Probekörper.

Material	Typenbezeichnung	Hersteller	Anmerkung
Polyethylen	BorPure MB7541	Borealis	
Polypropylen	HF955MO	Borealis	
Polyamid 12	Grilamid L 20 G	EMS	
Polyphthalamid	Vestamid HT <i>plus</i> LDS1031 black	Evonik	LDS-fähig
Fluoreszenzpartikel	F53	Litec LLL	unbeschichtet
Fluoreszenzpartikel	F53 stabilisiert	Litec LLL	Inert
Fluoreszenzpartikel	IceBird	NighTec	unbeschichtet
Fluoreszenz-Masterbatch	INN114_1	Gabriel-Chemie	
Fluoreszenz-Masterbatch	EVA-Funaden Optischer Aufheller	GRAFE	Org. Fluoreszenzmittel

mittels Feed Enhancement Technology (FET) dosiert wurde. Der schematische Aufbau der Compoundieranlage ist in Abbildung 3 (S. 9) dargestellt. Basierend auf ersten Vorversuchen am SKZ wurde die erforderliche Konzentration der Fluoreszenzmarker im Bauteil auf wenige ppm festgelegt. Diese Annahme wurde anhand der Ergebnisse der Veraschung eines Abfallstücks (Abbildung 5) abgeleitet, das bei der Compoundierung des ersten Masterbatches auf PE-Basis anfiel und einen anorganischen Rückstand von ca. 10 – 100 ppm aufwies. Neben den Fluoreszenzmarkern waren keine weiteren anorganischen Bestandteile des Materials bekannt.

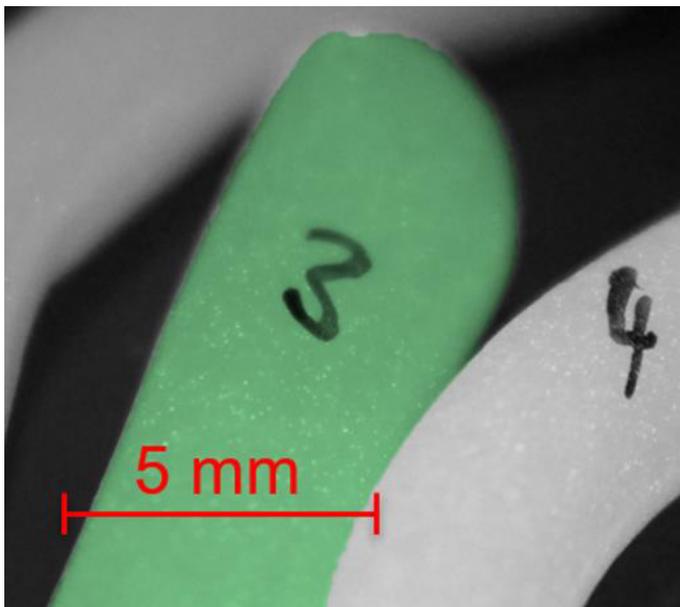


Abbildung 5: UV-Beleuchteter Strang der Compoundierung eines Polyethylen-Fluoreszenz-Masterbatches.

Für die Herstellung eines ersten Masterbatches wurde eine Konzentration von 5 Gew.-% Fluoreszenzmarker in Polyethylen angesetzt. Ein Masterbatch dieser Konzentration führte bei der späteren Verarbeitung mittels Spritzgießen zu Problemen, da die Dosiereinheit nicht für derart geringe Mengen ausgelegt war, um wenige ppm im Bauteil zu generieren. Daher wurde das Masterbatch erneut mit Polyethylen auf eine Konzentration von 0,5 Gew.-% verdünnt. In Tabelle 2 sind alle am SKZ hergestellten Masterbatches aufgelistet.

Tabelle 2: Am SKZ Hergestellte Masterbatches (MB) mit CaCO₃ und Fluoreszenzmarker.

Polymer	Füllstoff	Füllstoffanteil	Materialbezeichnung
Polyethylen	CaCO ₃ Hydrocarb 95T - ML	10 %	MB CaCO ₃ I 10 %
Polyethylen	CaCO ₃ Hydrocarb 95T - ML	50 %	MB CaCO ₃ I 50 %
Polyethylen	CaCO ₃ Omyacarb 5-AV	10 %	MB CaCO ₃ II 10 %
Polyethylen	CaCO ₃ Omyacarb 5-AV	50 %	MB CaCO ₃ II 50 %
Polyethylen	Fluoreszenzmarker - F53	10 %	PE-MB 10 %
Polyethylen	Fluoreszenzmarker - F53	5 %	PE-MB 5 %
Polyethylen	Fluoreszenzmarker - F53	0,5 %	PE-MB 0,5 %
Polyamid 12	Fluoreszenzmarker - F53 Stab.	0,5 %	PA-MB Stab. 0,5 %
Polyphthalamid	Fluoreszenzmarker - F53 Stab.	0,5 %	PPA-MB Stab. 0,5 %

Für die Herstellung des Polyphthalamid Compounds wurde in der Compoundierlinie anstelle eines Wasserbads ein Kettentransportband verwendet, da der Schmelzestrang beim Austrag aus dem Extruder abriss, wie in Abbildung 6 dargestellt.

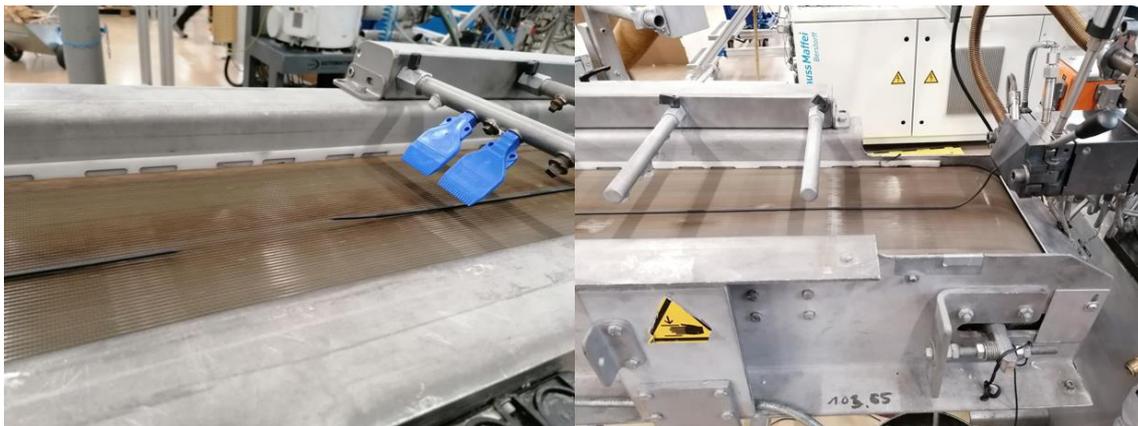


Abbildung 6: Schmelzestrang der PPA-Masterbatchherstellung mit Transportband.

3.3 Vorarbeiten am Minilab

Erste Versuche im kleinen Maßstab zur Demonstration der Realisierbarkeit des Projektziels wurden an einem Labor-Compounder der Marke Haake Minilab (Thermo

Fisher Scientific) durchgeführt (Abbildung 7). Das Fassungsvermögen des Geräts beträgt etwa 5 – 10 g.

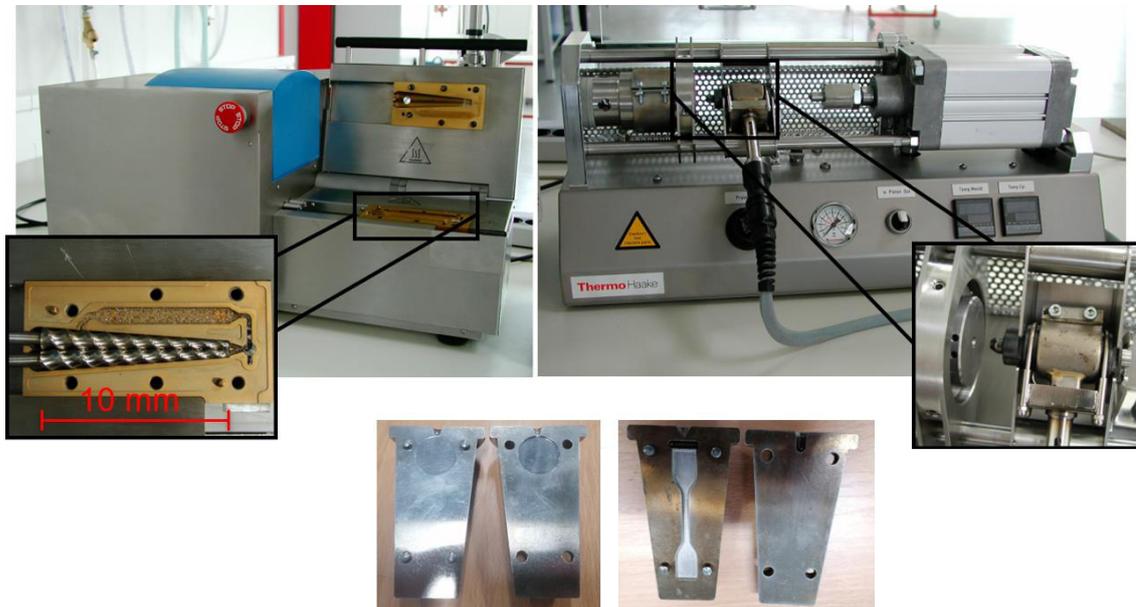


Abbildung 7: Aufbau des Minilab mit Plastifiziereinheit (links), Spritzgießeinheit (rechts) und den Werkzeugeinsätzen für Zugstäbe und runde Plättchen Ø ca. 23 cm.

Für die Herstellung erster Prüfkörper mittels Minilab wurde zu Beginn das 5 Gew.%ige- Masterbatch PE-MB 5 % verwendet. Für die Erreichung weniger ppm Fluoreszenzmarker im Prüfkörper wurde ein Granulat Korn (7 mg) des Masterbatches zerkleinert, wodurch die Konzentration an Fluoreszenzmarker stark fehlerbehaftet war. Weiterhin wurden PE--Probekörper mit den Masterbatches (organische Fluoreszenzmarker) und Fluoreszenzmarker auf Strontiumoxid-Basis vom GRAFE, PE-Probekörper mit einem Calciumcarbonat-Masterbatch (CaCO_3 von OMYA) sowie PP-Probekörper mit dem Masterbatch von GabrielChemie- hergestellt.

Um den Einfluss eines gefärbten Bauteils auf die Erkenn- bzw. Detektierbarkeit der Fluoreszenzmarker zu untersuchen, wurden schwarze, gelbe und dunkelblaue Probekörper aus PE mit einem Masterbatch (Litec LLL, 0,5 Gew.-% Fluoreszenzmarker) und Strontiumoxid-Pulver hergestellt. Zudem wurden ebenfalls schwarze, gelbe und dunkelblaue PP-Probekörper mit einem von Gabriel-Chemie zur Verfügung gestellten Masterbatch hergestellt (Tabelle 3). Die erforderliche Menge des Strontiumoxids war zu gering, um sie abzuwiegen. Daher wurde eine Spatelspitze des Pulvers zugegeben.

Tabelle 3: Rezepturen für farbige Probekörper mit Fluoreszenzmarkern.

PE mit Leuchtstoff	PE-Schwarz F53		PE-Gelb F53		PE-Blau F53	
	Gew.-%	g	Gew.-%	g	Gew.-%	g
Polyethylen	97,95	4,898	97,95	4,898	97,95	4,898
PE-MB FM II	0,05	0,0025	0,05	0,003	0,05	0,003
Farbmasterbatch	2	0,10	2	0,100	2	0,100
Gesamt	100	5,0	100	5,0	100	5,0
Benötigte Menge (g)	5		5		5	

PP mit Gabriel-Chemie MB	PP-Schwarz		PP-Gelb		PP-Blau	
	Gew.-%	g	Gew.-%	g	Gew.-%	g
Polypropylen	97,95	4,898	97,95	4,898	97,95	4,898
INN114_1	0,05	0,0025	0,05	0,003	0,05	0,003
Farbmasterbatch	2	0,10	2	0,100	2	0,100
Gesamt	100	5,0	100	5,0	100	5,0
Benötigte Menge (g)	5		5		5	

PE mit Strontiumoxid	PE-Schwarz SrO		PE-Gelb SrO		PE-Blau SrO	
	Gew.-%	g	Gew.-%	g	Gew.-%	g
Polyethylen	97,9975	4,900	97,9975	4,900	97,9975	4,900
Icebird (SrO)	0,0025	0,00013	0,0025	0,00013	0,0025	0,00013
Farbmasterbatch	2	0,100	2	0,100	2	0,100
Gesamt	100	5,0	100	5,0	100	5,0
Benötigte Menge (kg)	5		5		5	

3.4 Spritzgießen

Aufbauend auf den Vorversuchen am Minilab wurden an einer Spritzgießmaschine (EcoPower 110 von Wittmann Battenfeld) Probekörper in Form von Platten mit den Maßen 60 x 60 x 2 mm hergestellt. Hierfür wurden aus dem PE- und dem PP-Grundmaterial ohne Fluoreszenzmarker Referenzprobekörper hergestellt und anschließend 0,05 – 2 % der Masterbathe PEMB 5 % bzw. INN114_1 über eine separate Dosiereinheit zudosiert. Die Mischungsverhältnisse von Grundpolymer und Masterbatch sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Mischungsverhältnisse von Grundpolymer zu Masterbatch beim Spritzgießen.

PE mit Leuchtstoff	PE-Referenz		0,05 % MB		0,1 % MB	
	Gew.-%	g	Gew.-%	g	Gew.-%	g
Polyethylen	100	13,50	99,95	13,493	99,9	13,487
PE-MB 5 %	0	0,00	0,05	0,007	0,1	0,014
Gesamt	100	13,5	100	13,5	100	13,5
Benötigte Menge (g)	13,5		13,5		13,5	

PP mit blauem Leuchtstoff	PP-Referenz		1 % MB		2 % MB	
	Gew.-%	kg	Gew.-%	kg	Gew.-%	kg
Polypropylen	100	13,5	99	13,4	98	13,2
INN114_1	0	0	1	0,14	2	0,27
Gesamt	100	13,5	100	13,5	100	13,5
Benötigte Menge (kg)	13,5		13,5		13,5	

In darauffolgenden Versuchen wurden auf derselben Anlage farbige PE-Probekörper aus PE--Grundpolymer, Farbmasterbatches und dem Masterbatch PE-MB 0,5 % mit einem Anteil von 0,5 Gew.-% Fluoreszenzmarker hergestellt. Dazu wurden verschiedene Dryblends aus dem PE-Grundpolymer und 2 Gew.-% Farbmasterbatch (rot, gelb, grün, blau, schwarz, -metallic-silber) hergestellt. Die Dosierung des Fluoreszenzmasterbatches erfolgte über einen separaten Dosierer und wurde auf 0,025 Gew.-% eingestellt, woraus sich eine Fluoreszenzmarker-Konzentration von 125 ppm ergibt.

Weitere Spritzgießarbeiten wurden vom Projektpartner Dr. Boy durchgeführt. Dabei wurden von SKZ und Hahn-Schickard die Polymere PA12, laserstrukturierbares PPA und die beiden daraus hergestellten Masterbatches PA-MB Stab. 0,5 % und PPA-MB Stab. 0,5 % bereitgestellt. Die Mischungsverhältnisse von Grundpolymer und Masterbatch beliefen sich auf 0,5 Gew.-% Masterbatch für PA12 und 1 Gew.-% für PPA. PA12 wurde zu Universalstäben und einem Bauteil mit mikrostrukturierter Oberfläche, PPA zu Universalstäben und 3-Stufenplatten verarbeitet, jeweils mit und ohne Fluoreszenzmarker.

3.5 Materialcharakterisierung

Mithilfe mechanischer, thermischer und optischer Untersuchungen wurde der Einfluss der Fluoreszenzpartikel auf den Kunststoff untersucht.

Die mechanischen Eigenschaften wurden hinsichtlich Zug- und Biegeprüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 527 und DIN EN ISO 178 (Z010, ZwickRoell) durchgeführt.

Für die Prüfungen wurde ein Wegaufnehmer des Typs MultiXtens verwendet. Für die Zugprüfungen wurde ein 10 kN Kraftaufnehmer, für die Biegeprüfungen eine 500 N Kraftmessdose verwendet. Die Schlagzähigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 179-1 geprüft. Hierfür wurde für PA 12 ein 50 J Pendel und für PPA ein 7,5 J Pendel verwendet. Alle Messungen wurden im Normklima durchgeführt.

Die thermischen Eigenschaften erfolgten an einer DSC des Typs 204 F1 Libra (Netzsch). Es wurden jeweils zwei Aufheizkurven und eine Abkühlkurve mit definierten Aufheiz- und Abkühlraten von 10 K/min aufgenommen.

Unter Verwendung der Heitzischmikroskopie wurde das Kristallisationsverhalten von PE durch Einbringung von Fluoreszenzpartikeln untersucht. Dies erfolgte an einem Gerät des Typs AxioScope.A1 (Carl Zeiss Microscopy). Das Mikroskop ist mit einem Heiz-/Kühltisch THMS600 der Firma Linkam ausgestattet. Die Heiz- bzw. Kühlrate wurde mit 10 K/min festgelegt. Bei den Aufheiz- und Abkühlvorgängen wurden in Abständen von 5 K Bilder aufgenommen.

3.6 Additive Fertigung

Der Projektpartner HERZ stellte aus den vom SKZ bereitgestellten Materialien PA12 und PA-MA Stab. 0,5 % Filamente mit 1,75 mm Durchmesser für die additive Fertigung her. Diese wurden anschließend an den Projektpartner Apium Additive Technologies übergeben und dort nach Vorgabe von Hahn-Schickard mithilfe einer entsprechenden Vorlage zu einem additiv gefertigten Bauteil verarbeitet.

3.7 Auslegung der Hardware

Zur Erfassung des Verteilungsmusters der Fluoreszenzmarker, die in die Kunststoffteile eingebracht wurden, wurde ein Hardwaresystem konzeptioniert und aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten des Hardwaresystems sind die Beleuchtung, um die Fluoreszenz anzuregen, sowie eine Kamera mitsamt Objektiv zur fotografischen Aufnahme des Partikelmusters.

Für erste Demonstrationszwecke sowie zur Auslegung der Hardwarekomponenten wurden Vorversuche durchgeführt. Hierfür wurden vom SKZ Zugstäbe und Einkaufschips mit eingebrachten Fluoreszenzmarkern von Litec LLL zur Verfügung gestellt. Unter Verwendung einer Schwarzlichtbeleuchtung konnte beim Projektpartner hema electronic gezeigt werden, dass die Fluoreszenzpartikel zum Leuchten angeregt

werden können. Während der Einkaufschip mit der Beschriftung .068 vollflächig fluoreszierte, waren beim Bauteil .067 die Fluoreszenzpartikel individuell sichtbar.

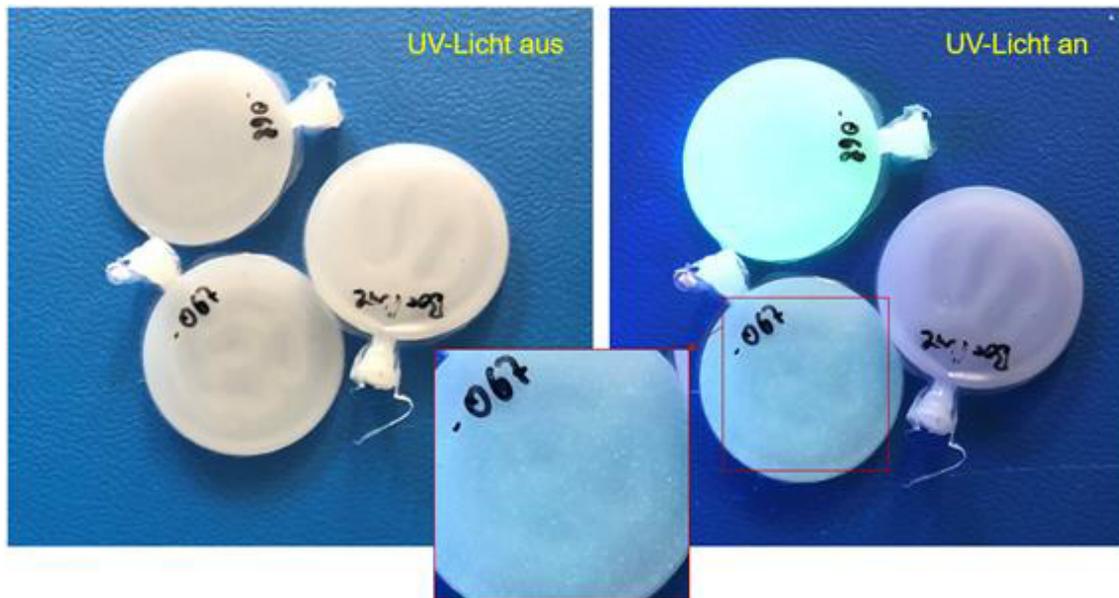


Abbildung 8: Vorversuche mit und ohne UV-Licht an Zugstäben und Einkaufschips mit eingebrachten Fluoreszenzmarkern.

Des Weiteren wurden bei Hahn-Schickard Kunststoffplättchen bei Vorversuchen verwendet, in welche die gleichen Leuchtstoffe eingebracht wurden wie bei den zuvor beschriebenen Einkaufschips und Zugstäben. Die Plättchen wurden mit einer UV-Taschenlampe beleuchtet, die Licht mit einer Wellenlänge von ca. 395 nm emittierte. Vor der Taschenlampe wurde ein Diffusor angebracht, um eine homogenere Beleuchtung der Kunststoffplättchen zu erreichen. Als Kamera diente eine Canon PowerShot SX70 HS. Es wurden Aufnahmen sowohl mit als auch ohne Bandpassfilter durchgeführt, um Störeinflüsse des Umgebungslichts zu minimieren. Der Filter stammt von der Firma bk Interferenzoptik Elektronik GmbH und wurde vom Projektpartner Litec LLL zur Verfügung gestellt. Gemäß Transmissionskurve des Bandpassfilters liegt der Transmissionspeak bei 522 nm, was dem Licht entspricht, das von den angeregten Fluoreszenzmarkern emittiert wird. Abbildung 9 zeigt die Aufnahmen von zwei Plättchen, bei denen sich die Partikelkonzentration unterscheidet. Die dargestellten Bilder wurden bereits vom original aufgenommenen RGB-Format in Graustufen konvertiert. Zwischen den Aufnahmen mit und ohne Bandpassfilter ist in Bezug auf die Abbildung der Fluoreszenzpartikel nur ein marginaler Unterschied erkennbar. Dennoch haben die Partikel mit Bandpassfilter einen geringfügig höheren Kontrast, weshalb bei der Konstruktion des Hardwaresystem ein Bandpassfilter vorgesehen wurde.

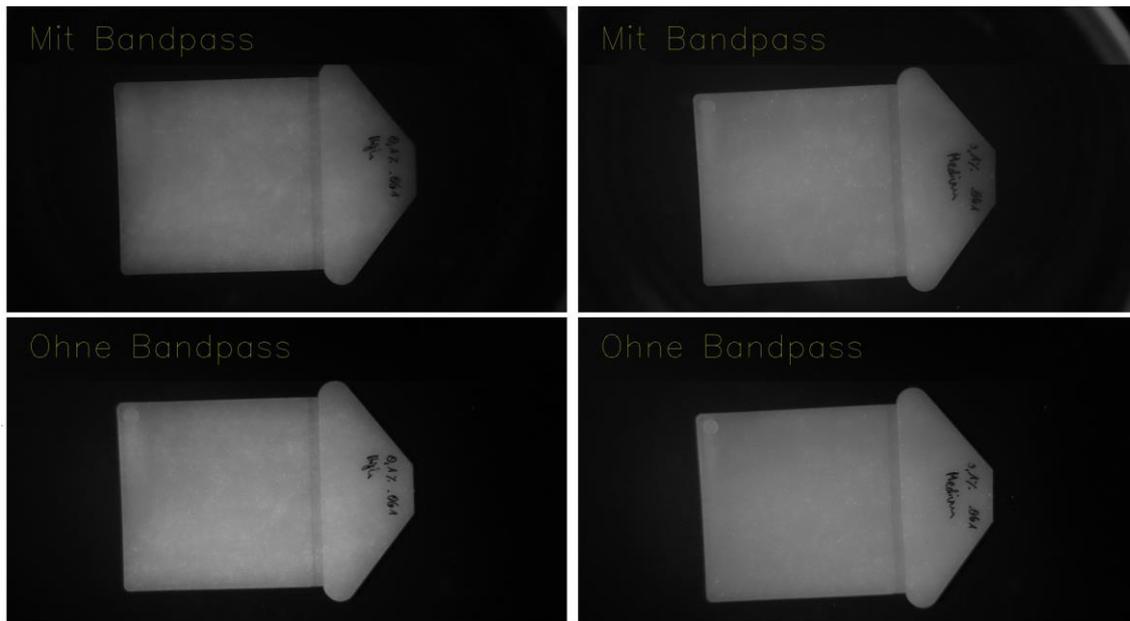


Abbildung 9: Aufnahmen von zwei PE-Platten mit unterschiedlicher Partikelkonzentration, aufgenommen mit und ohne Bandpassfilter

Neben dem Leuchtstoff von Litec LLL, der sowohl bei einer Wellenlänge von 365 nm als auch bei 395 nm anregbar ist, wurde bei Litec LLL das Anregungs- und Emissionsspektrum des Leuchtstoffs von GabrielChemie bestimmt. Demnach ist das Maximum der Anregung bei 338 nm, wobei die Anregbarkeit ab 340 nm rapide abfällt. So konnte im Rahmen der Vorversuche tatsächlich kein Partikelmuster erkannt werden, sofern die Musterteile bei 365 nm beleuchtet werden. Trotz umfangreicher Recherche wurden lediglich LEDs mit einer Emissionswellenlänge von 340 nm und einer Leistung von 41 mW gefunden, deren Einzelpreis bei 85 € pro Stück lag. Aufgrund der hohen Kosten für die 340 nm-Beleuchtung wurden im Projekt lediglich LEDs verwendet, die Licht bei 365 nm bzw. 395 nm emittieren.

Abbildung 10 zeigt ein gelbes Kunststoffplättchen mit eingebrachten Fluoreszenzpartikeln, das einmal bei der 365 nm Beleuchtung sowie bei der 395 nm Beleuchtung aufgenommen wurde. Es ist ersichtlich, dass die Fluoreszenzpartikel bei 365 nm deutlich besser sichtbar sind. Bei 395 nm können zwar ebenso Partikel erkannt werden, jedoch nicht so zahlreich und mit geringerem Kontrast. Der Vergleich beider Beleuchtungen wurde auch bei drei weiteren Plättchenfarben durchgeführt. Bei den durchgeführten Messreihen wurde daher die 365 nm Beleuchtung genutzt.

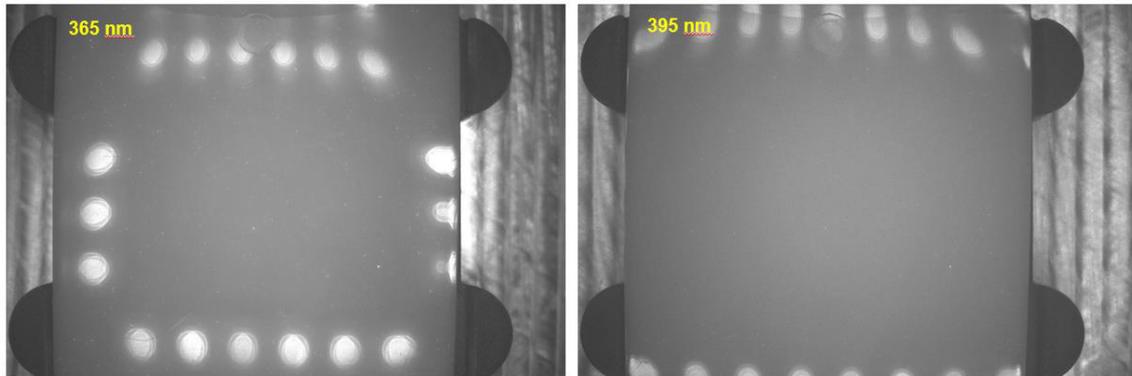


Abbildung 10: Vergleich der Aufnahmen eines Plättchens bei 365 nm und 395 nm Beleuchtung. Für Vorversuche zur Auswahl der Kamera stellte der Projektpartner Matrix Vision zwei Kameras zur Verfügung, eine zur Aufnahme von Farbbildern (mvBlueFox3-2064G-1111) sowie eine Monochromkamera (mvBlueFox3-2064C-1111). Die Resultate beider Kameras wurden im Rahmen der Vorversuche verglichen, indem Kunststoffplättchen mit beiden Kameras aufgenommen wurden. Das aufgenommene Farbfoto wurde in Graustufen konvertiert, bevor Farb- und Monochromaufnahme verglichen wurden. Die Resultate sind in Abbildung 11 zu sehen. In allen Aufnahmen sind die Fluoreszenzpartikel zu erkennen. Die Monochromkamera führt jedoch zu geringfügig schärferen Aufnahmen und einem besseren Kontrast. Daher wurde in den Versuchen die Monochromkamera verwendet.



Abbildung 11: Vergleichsaufnahmen der von Matrix Vision zur Verfügung gestellten Farb- sowie Monochromkamera.

3.8 Identifikationsalgorithmus

Im Vorfeld der Entwicklung des Identifikationsalgorithmus wurden in Abstimmung mit dem PA Anforderungen festgelegt. Daraus abgeleitet standen die folgenden Entwicklungsziele im Vordergrund, die für die Praxistauglichkeit des Verfahrens besonders relevant sind:

- Die im Bild zu sehenden Fluoreszenzpartikel sollten mit Hilfe von Methoden der Bildverarbeitung zuverlässig im Bild detektiert werden.

- Die im Bild enthaltenen Informationen zur individuellen Partikelverteilung sollten auf wenige Kilobyte Datengröße komprimiert werden. Zur Rückverfolgung von Bauteilen genügt es somit, anstatt des aufgenommenen Bildes nur die komprimierte Version in einer Datenbank abzuspeichern.
- Die Verteilungsmuster der Partikel sollten verglichen werden können, wobei die Ähnlichkeit von zwei Verteilungsmustern mit Hilfe einer Metrik quantitativ bestimmt werden können sollte. Die Metrik sollte sich auf die komprimierte Version der Bauteilaufnahme anwenden lassen.
- Der Kompressionsalgorithmus sollte in Kombination mit der Vergleichsmetrik möglichst robust gegenüber Positionstoleranzen des Bauteils sein, insbesondere in Bezug auf Rotation und Translation.
- Der Kompressionsalgorithmus sollte in Kombination mit der Vergleichsmetrik möglichst robust gegenüber Oberflächenveränderungen des Bauteils sein.

3.9 Identifikationstests

Nachdem die im Projekt entwickelten Teilaspekte wie Masterbatch, Hardware und Identifikationsalgorithmus zusammengeführt wurden, konnten Identifikationstests durchgeführt werden, um die Zuverlässigkeit des Verfahrens, die Praxistauglichkeit sowie weiteres Optimierungspotential für zukünftige Arbeiten zu ermitteln. Die beim SKZ und bei Projektpartnern spritzgegossenen Kunststoffteile dienten dabei als Versuchsmuster. Es lagen verschiedene Bauteiltypen vor, die sich hinsichtlich Geometrie, Materialbeschaffenheit und/oder Farbe unterschieden.

Allen Musterteilen, die im Rahmen der Versuche aufgenommen wurden, wurde eine Referenznummer zugeordnet. Dadurch konnten die Teile individuell unterschieden werden, was zur Validierung der durchgeführten Identifikationsprozesse diente.

Zur Durchführung von Identifikationstests wurden die zur Verfügung stehenden Musterteile mindestens zweimal aufgenommen. Die erste Aufnahme eines Bauteils simulierte die Registrierung des Bauteils, was im Produktionsumfeld dem erstmaligen Aufnehmen und Anlegen eines Bauteils in der Datenbank entspricht. Die zweite Aufnahme desselben Bauteils simuliert somit den ersten Identifikationsprozess des Bauteils. Dabei wird dem Bauteil eine ID zugeordnet, um beispielsweise Produktionsparameter damit zu verknüpfen oder Produktionsprozesse bauteilabhängig zu steuern. Es existierten für jede Messreihe somit mindestens zwei Bilddatenbanken, eine zur Registrierung sowie eine zur Identifizierung der Bauteile. Zwischen zwei Aufnahmen

eines Bauteils wurde dieses aus der Vorrichtung, die zur Positionierung des Teils unter der Kamera diente, entnommen und neu eingelegt.

3.10 MID-Prozesskette

Die Rückverfolgbarkeit wurde im Rahmen des Projekts entlang der Produktionslinie zur Herstellung von spritzgegossenen Schaltungsträger (engl. Molded Interconnect Devices, MIDs) bei Hahn-Schickard ausgetestet. Dazu wurden Bauteile, die beim Projektpartner Dr. Boy spritzgegossen wurden, in der MID-Prozesskette weiter prozessiert.

Die MID-Prozesskette ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt. Der Grundkörper wird zunächst spritzgegossen. Der Kunststoff enthält dabei spezielle Additive, die zur anschließenden Metallisierung notwendig sind. Im nächsten Schritt werden auf dem Kunststoffgrundkörper die metallisierten Strukturen beziehungsweise die späteren Leiterbahnen mit einem Laser vorgezeichnet. In den Bereichen, in denen der Laserstrahl auf die Oberfläche trifft, werden die speziellen Additive im Kunststoff "aktiviert". Dadurch kann im darauffolgenden außenstromlosen Metallisierungsprozess in diesen Oberflächenbereichen eine Kupferschicht aufwachsen. Das vollständige Schichtsystem, das bei der Metallisierung aufgebracht wurde, war im Projekt Kupfer, Nickel und Gold. Letztlich kann das Bauteil mit SMD-Komponenten bestückt werden. Die Bearbeitungsschritte der Prozesskette können einen vielfältigen Einfluss auf das Bauteil beziehungsweise dessen Oberfläche haben. Insbesondere der Kontakt mit verschiedenen chemischen Substanzen bei der Metallisierung könnte zu Veränderungen der an der Oberfläche liegenden Fluoreszenzpartikel führen.

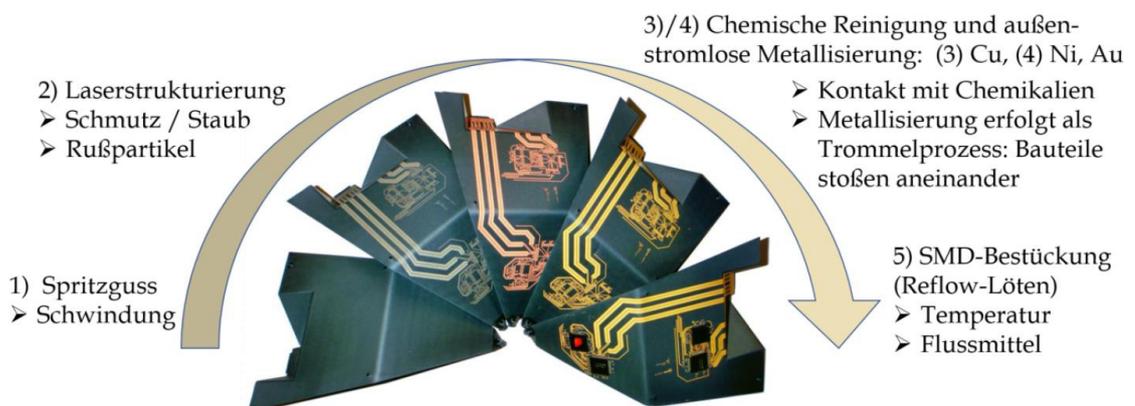


Abbildung 12: Schematische Darstellung der MID-Prozesskette und der damit verbundenen Einflussfaktoren auf die Oberfläche. [15]

Da davon auszugehen war, dass das im Projekt entwickelte Masterbatch andere Einstellungen zur Metallisierung via Laserdirektstrukturierungsverfahren (LDS-

Verfahren) benötigt als das PPA-Grundmaterial, wurde im Vorfeld der Laserstrukturierung und Metallisierung ein umfangreiches Parameter-Screening durchgeführt. Dadurch konnten geeignete Laser- und Metallisierungsparameter gefunden werden.

4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Materialien und Bauteile

4.1.1 Compoundieren

Unter Verwendung der in 3.1 aufgeführten Materialien, wurden am SKZ erfolgreich Masterbatches mit unterschiedlichen Konzentrationen verschiedener Füllstoffe hergestellt. Grundsätzlich ist wichtig, dass die Füllstoffe als Aggregate vorliegen, da diese im Vergleich zu Agglomeraten im Extruder nicht zerstört werden können. Als geeigneter Füllstoff zur Realisierung des Projektziels stellte sich das von der Firma Litec LLL bereitgestellte Fluoreszenzpulver F53 heraus. Dieses lässt sich bereits bei einer Wellenlänge von 365 nm anregen und emittiert sehr stark im grünen Spektralbereich. In einer Konzentration von 5 Gew.% des Fluoreszenzmarkers in einer Kunststoffmatrix verleiht es dem ungefärbten Kunststoff ohne UV-Anregung eine gelb-grüne Eigenfarbe, die bei einer Konzentration von 0,5 Gew.% deutlich weniger stark ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 13).

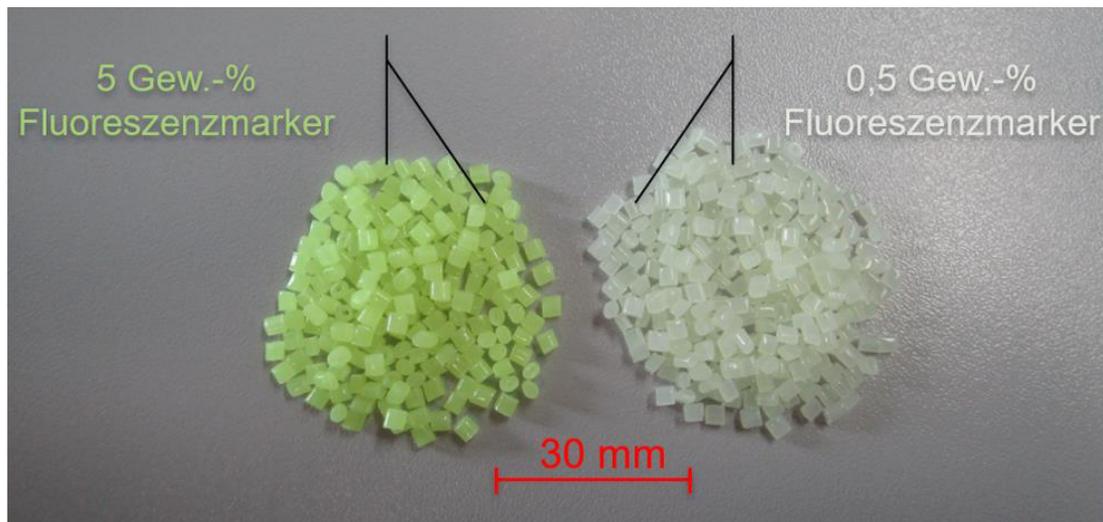


Abbildung 13: PE-Masterbatch mit 5 Gew.-% und 0,5 Gew. % ohne UV-Beleuchtung.

Die direkte Herstellung eines Masterbatches mit 0,5 Gew.-% Fluoreszenzmarker war nicht möglich, da die Dosiereinheiten in der Compoundierlinie keine derart geringen Mengen Füllstoff dosieren konnten. Daher musste eine zweistufige Compoundierung erfolgen. Im ersten Schritt wurde ein Masterbatch mit 5 Gew.-% Fluoreszenzmarker hergestellt und direkt im Anschluss erneut mit Neuware des Polymers auf 0,5 Gew.-% verdünnt. Bei dieser Konzentration können die einzelnen Fluoreszenzartikel mit einer

Partikelgröße von $14,5 \mu\text{m}$ (d_{50}) im Granulat Korn durch Anregung mit UV-Licht gut erkannt werden, wie die UV--Mikroskopie-Aufnahme in Abbildung 14 zeigt. Eine vergleichsweise hohe Konzentration von 5 Gew.-% führt dazu, dass das Masterbatch ohne Beleuchtung unter UV-Beleuchtung sehr stark und flächendeckend leuchtet, sodass einzelne Partikel visuell nicht erkannt werden können.

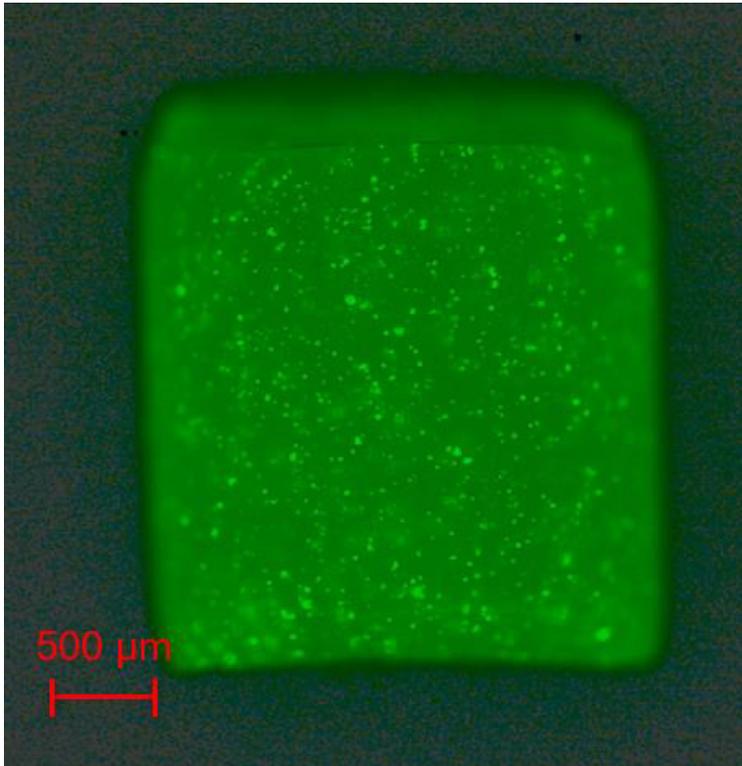


Abbildung 14: Granulatkorn eines Masterbatch mit 0,5 Gew.-% Fluoreszenzmarker.

Nicht fluoreszierende Füllstoffe wie CaCO_3 sind für die Anwendung zur Bauteilidentifizierung ungeeignet, da sie mit der im Projekt verwendeten Hardware nicht detektiert werden können. Das von GabrielChemie bereitgestellte Masterbatch konnte mithilfe der am SKZ zur Verfügung stehenden UV-Quellen mit 365 nm Wellenlänge nicht angeregt werden. Gemäß den Erkenntnissen in KAPITEL 3.6 ist zur adäquaten Anregung der Fluoreszenzmarker von GabrielChemie Licht mit geringerer Wellenlänge notwendig.

4.1.2 Vorversuche am Minilab

Anhand der Vorversuche am Minilab konnte die Machbarkeit demonstriert werden, Probekörper herzustellen, dessen Fluoreszenzpartikel erst unter UV-Bestrahlung sichtbar werden und ein zufälliges Partikelmuster wiedergeben (vgl. Abbildung 15). Zur

Anregung der Fluoreszenzpartikel standen am SKZ zwei LED-Lampen zur Verfügung, die UV-Licht im Bereich von 395 nm bzw. 365 nm emittierten, wobei die Fluoreszenzpartikel bei 365 nm visuell deutlich besser erkennbar waren.



Abbildung 15: Am SKZ hergestellte Einkaufschips und Zugstäbe (Typ 5A) mit Fluoreszenzmarkern (links) und Zugstab mit UV-Licht beleuchtet (395 nm).

Durch das geringe Fassungsvermögen des Extruders von 5 – 10 g war zur Erzeugung von 25 ppm Fluoreszenzpartikel im Probekörper eine Einwaage weniger Milligramm des Masterbatch mit 5 Gew.-% Fluoreszenzpartikel erforderlich. Hierfür wurde ein Granulat Korn mittels Skalpell zerkleinert. Der Fehler bei der Einwaage wird relativ hoch eingeschätzt, wobei erkennbar ist, dass der gewünschte Effekt eines zufälligen Partikelmusters mit dem angestrebten Konzentrationsbereich im Bauteil von wenigen ppm erzielt werden konnte.

Weiterhin konnte anhand der Minilab-Versuche gezeigt werden, dass die Fluoreszenzpartikel sowohl bei ungefärbten als auch bei gefärbten Materialien mit 2 Gew.-% Farbmaterbatch erkennbar sind (vgl. Abbildung 16). Die Zugabe des Masterbatches mit 5 Gew.-% Fluoreszenzmarker erfolgte wie bei den ungefärbten Probekörpern, wodurch die Einwaage relativ stark fehlerbehaftet eingeschätzt wird. Die Zugabe des Strontiumoxid-Pulvers erfolgte durch Zugabe einer Spatelspitze in den Einfüllstutzen des Minilab. Durch die nach oben aufsteigende Warmluft wurde bei der Zugabe des Pulvers eine geringe Menge aufgewirbelt. Daher ist die Konzentration in den

Bauteilen unbekannt. Die Versuche mit Strontiumoxid zeigen ausschließlich die Realisierbarkeit eines individuellen Partikelmusters im Probekörper. Für weitere Versuche mit technischen Kunststoffen (z. B. Polyamid) wurde Strontiumoxid nicht verwendet, da es unter Anwesenheit von Wasser zur Bildung von Strontiumhydroxid ($\text{Sr}(\text{OH})_2$) kommen kann, was zu den mittelstarken Basen zählt und eine pH-Wert von etwa 13 aufweist. Dies kann bei hygroskopischen Polymeren wie Polyamiden oder Polyurethanen zu einer basisch katalysierten Hydrolyse führen, wodurch das Polymer degradiert. [16], [17], [18]

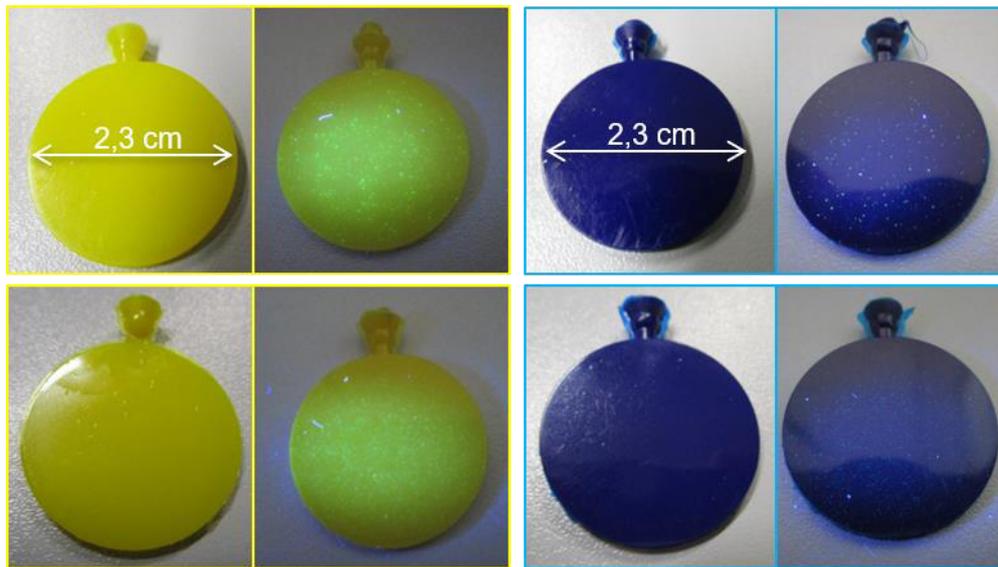


Abbildung 16: Gelbe und Blaue Probekörper mit den Fluoreszenzmarkern F53 (oben) und SrO (unten) unbeleuchtet (links) und beleuchtet (rechts, 365 nm).

4.1.3 Spritzgießen

Um die Machbarkeit der Probekörperherstellung in einem Spritzgießprozess darzustellen, wurden am SKZ Probekörper-Platten ($60 \times 60 \times 2 \text{ mm}^3$) aus den Masterbatches von Gabriel-Chemie und dem am SKZ hergestellten Masterbatch PEMB 5 % spritzgegossen. Die Geometrie der Probekörper wurde so gewählt, dass im Prüfstand (UV-Beleuchtung und Kamerasystem) bei Hahn-Schickard eine ausreichend große Prüffläche zur Verfügung stand und der Probekörper in eine verhältnismäßig einfache Halterung eingesetzt werden konnte. Für die Einstellung der Zielkonzentration von ca. 250 ppm Fluoreszenzmarker im Bauteil war die verwendete Scheibendosierung nicht optimal ausgelegt. Dadurch wurde das Masterbatch sehr unregelmäßig zudosiert, wodurch Konzentrationsschwankungen in der Schnecke und somit auch in den Bauteilen auftraten (vgl. Abbildung 17). Eine Konzentration von 5 Gew.% Fluoreszenzpartikel im Masterbatch wurde als zu hoch erachtet und scheint für reproduzierbare Erzeugung eines

individuellen Partikelmusters mit einer für jedes Bauteil vergleichbaren Konzentration an Fluoreszenzpartikeln ungeeignet.



Abbildung 17: Ungefärbte Spritzgießbauteile mit geringer (links), mittlerer (Mitte) und hoher Fluoreszenzpartikelkonzentration (rechts).

Die mit dem Masterbatch von Gabriel-Chemie hergestellten PP-Probekörper konnten mithilfe der UV-Quellen am SKZ (365 nm Wellenlänge) nicht angeregt werden, sodass die Partikel nicht sichtbar gemacht werden konnten.

Die Herstellung der gefärbten Probekörper erfolgte mit 0,025 Gew.-% des Masterbatches PE-MB 0,5 % (vgl. Abbildung 18). Die ungefärbten Referenzplatten wurden mit einer UV-Quelle mit 365 nm- beleuchtet. Visuell betrachtet konnten keine Schwankungen in der Fluoreszenzmarker-Konzentration festgestellt werden (ca. 60 – 80 Probekörper). Die Herstellung eines Fluoreszenzmasterbatches mit einem Anteil von ca. 0,5 Gew.-% scheint geeignet, um eine geringe Konzentration der Fluoreszenzmarker im Bauteil von wenigen ppm zu generieren. Weitere analytische Untersuchungen wie Veraschung oder Thermogravimetrische Analyse (TGA) zur Bestimmung der Fluoreszenzmarker-Konzentration im Bauteil wurden nicht vorgenommen.



Abbildung 18: Spritzgießbauteile (v. l. n. r. ohne Farbe, rot, gelb, grün, blau, silber-metallic, schwarz).

Unter Beleuchtung der Probekörper mit 365 nm UV-Strahlung wurde deutlich, dass der Farbton einen deutlichen Einfluss auf Anzahl und Leuchtkraft/Intensität der erkennbaren

Fluoreszenzpartikel hat, wie in Abbildung 19 anhand eines gelben und eines schwarzen Probekörpers zu sehen ist. Für eine Bauteilidentifizierung muss eine ausreichende Menge an Fluoreszenzpartikeln für das Kamerasystem erkennbar sein. Daraus wird abgeleitet, dass die Konzentration der Fluoreszenzpartikel in einem Bauteil individuell an dessen Farbe angepasst werden muss.

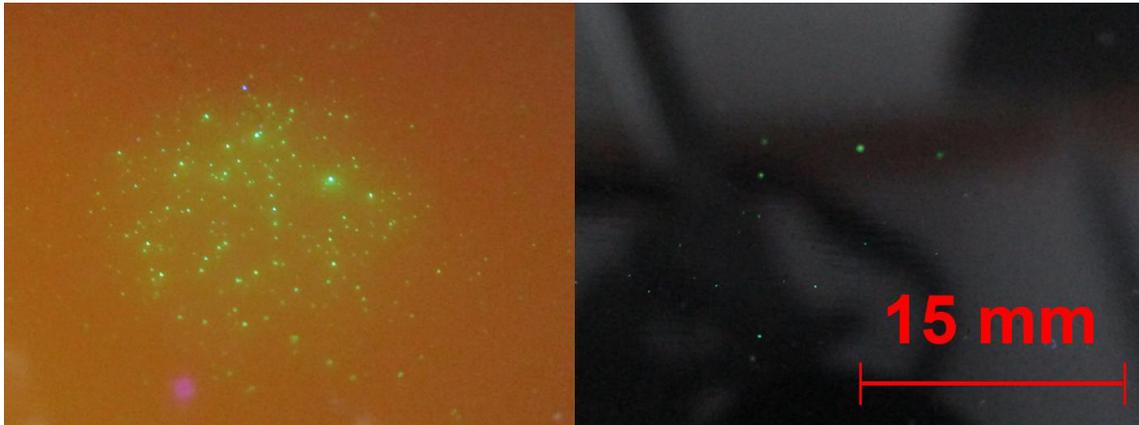


Abbildung 19: Gelber und schwarzer PE-Probekörper mit 365 nm UV-Strahlung beleuchtet.

Eine Übersicht zu den vom Projektpartnern Dr. Boy hergestellten Universalstäben, 3-Stufenplatten und Bauteilen mit mikrostrukturierter Oberfläche und von HERZ hergestellten Filament-Spulen ist in Abbildung 20 dargestellt.



Abbildung 20: Übersicht der von den Projektpartnern Dr. Boy hergestellten Probekörpern (links) und der von HERZ hergestellten Filament-Spulen (rechts).

4.2 Materialcharakterisierung

Mechanische Prüfungen

Die Zugprüfung erfolgte anhand der von Dr. Boy hergestellten Universalstäbe mit den Maßen $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$. Durch die fehlende Schulter der Prüfkörper hatten diese keinen optimalen Halt in der Probekörperhalterung der Zugprüfmaschine und rutschten während des Zugvorgangs aus der Vorrichtung. Die Ergebnisse der Zugprüfung sind daher nicht auswertbar.

Die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung sind in Tabelle 5 dargestellt, mit den Werten E_{mod} für E-Modul, σ_M für die maximale Biegespannung und ε_M für die Biegedehnung bei maximaler Biegespannung. Es ist erkennbar, dass für alle drei Messgrößen das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bei den Proben auf Basis von PA 12 mit und ohne Fluoreszenzpartikel vergleichbar sind. Bei einem Anteil von 0,25 Gew.-% Fluoreszenzpartikel in PA 12 ist kein Einfluss auf die Biegeeigenschaften des Polymers erkennbar. Da das untersuchte PA 12 nicht gefärbt war, konnte mit 0,25 Gew.-% Fluoreszenzmarker eine ausreichende Anzahl an Partikeln auf der Oberfläche durch UV--Bestrahlung erzeugt werden. Im Falle gefärbter Kunststoffe wurde in Kapitel 4.1.3 dargestellt, dass die notwendige Konzentration der Fluoreszenzpartikel von der Farbe des Kunststoffs abhängt. Ein schwarz gefärbtes PA 12 Bauteil müsste daher mit deutlich mehr Partikeln ausgestattet werden, um eine ausreichende Anzahl an Partikel auf der Oberfläche sichtbar zu machen. Bei steigender Konzentration der Partikel ist davon auszugehen, dass die mechanischen Eigenschaften des Polymers dadurch beeinträchtigt werden. Die Partikel sind als Störstellen in der Polymermatrix zu betrachten. Im Querschnitt eines Prüfkörpers wäre mit steigender Partikelkonzentration weniger Polymer vorhanden, das die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Da die Fluoreszenzpartikel in PA 12 inert gegenüber Hydrolyse-anfälligen Kunststoffen sind, ist nicht davon auszugehen, dass die Partikel eine chemische Anbindung an die Polymermatrix besitzen, wodurch die mechanischen Eigenschaften begünstigt würden.

Tabelle 5: Ergebnisse der Biegeprüfung von PA 12 mit und ohne Fluoreszenzpartikeln.

Serie	PA 12 - Referenz			PA 12 mit 0,25 % Fluoreszenzpartikel		
	E_{mod} MPa	σ_M MPa	ε_M %	E_{mod} MPa	σ_M MPa	ε_M %
\bar{x}	1310	58,41	7,06	1330	58,56	7,12
s	10,3	0,36	0,08	17,5	0,62	0,08
v	0,79	0,62	1,09	1,32	1,06	1,08

Die Ergebnisse der Schlagzähigkeit sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Werte der PA 12 Materialien entsprechen den Angaben im Materialdatenblatt mit $> 100 \text{ kJ/m}^2$. Die Werte der PPA-Materialien liegen mit $> 20 \text{ kJ/m}^2$ deutlich höher als die im Materialdatenblatt angegeben 13 kJ/m^2 . Sowohl die PA 12 als auch die PPA Proben zeigen hinsichtlich der Schlagzähigkeit keine erkennbaren Unterschiede durch Einbringung der Fluoreszenzpartikel, wodurch nicht von einer Versprödung auszugehen ist.

Tabelle 6: Kerbschlagzähigkeit von PA 12 und PPA mit und ohne Fluoreszenzpartikel.

Proben-Name	Anzahl Probekörper	Kerbschlagzähigkeit / (kJ/m²)	Streuung (kJ/m²)	Bruchbild
PA 12	5	179,9	1,7	Nicht gebrochen
PA12 0,25 %	9	180,25	8,2	Nicht gebrochen
PPA	10	21,48	4,5	Vollständiger Bruch
PPA 0,5 %	10	18,32	2,3	Vollständiger Bruch

Thermische Prüfungen

Die Untersuchung des Einflusses von Fluoreszenzpartikel auf das thermische Verhalten der Kunststoffe PE, PP, PA 12 und PPA erfolgte mithilfe kalorimetrischer Messungen (DSC). Dafür wurden von jedem der oben aufgeführten Polymertypen Proben mit und ohne Fluoreszenzpartikel (v. Projektpartner Litec LLL) untersucht. Die Schmelzenthalpie, Schmelz- und Kristallisationspeaks der ersten und zweiten Aufheizung sowie der Abkühlung sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Schmelztemperaturen liegen bei allen untersuchten Polymeren in einem für den jeweiligen Polymertyp charakteristischen Bereich. Diese Bereiche sind in der Literatur angegeben mit den Kristallitschmelztemperaturen für: [19]

PE = 130 – 165 °C

PP = 160 – 166 °C

PA 12 = 170 – 185 °C

PPA = 270 – 310 °C

Innerhalb eines Polymertyps ist durch die Anwesenheit der Fluoreszenzpartikel kein nennenswerter Einfluss auf das Schmelz- und Kristallisationsverhalten erkennbar. Leichte Abweichungen der Schmelzenthalpien kann durch die manuelle Auswertung der Peaks zustande kommen. Die Enthalpie im Abkühlprozess von PPA scheint fehlerbehaftet zu sein, was an einer unvollständigen Aufschmelzung des Materials liegen kann. Alle untersuchten Polymere sind teilkristalline Werkstoffe, deren Kristallisationsverhalten beim Abkühlen aus der Schmelze in den festen bzw. glasartigen Zustand durch anorganische Füllstoffe beeinflusst werden kann. Diese Füllstoffe können grundsätzlich eine nukleierende Wirkung haben und die für die Kristallisation erforderliche Keimbildung zu höheren Temperaturen verschieben. [20]

Tabelle 7: Schmelze- bzw. Erstarrungspeaks und Schmelzenthalpie der ersten und zweiten Aufheizung sowie der Abkühlung von PE, PP, PA 12 und PPA jeweils mit (FM) und ohne Fluoreszenzmarker.

Probe	1. Aufheizung		2. Aufheizung		Abkühlung	
	Peak / °C	ΔH_m / (J/g)	Peak / °C	ΔH_m / (J/g)	Peak / °C	ΔH_m / (J/g)
PE	134,4	157,1	132,9	164,4	112,3	-168,4
PE FM	135,4	153,6	134,0	163,9	112,0	-168,3
PP	171,1	106,1	169,8	120,2	128,8	-114,1
PP FM	172,1	104,1	169,4	118,9	128,4	-115,4
PA 12	182,5	56,93	180,1	53,58	152,0	-57,07
PA 12 FM	182,2	57,66	180,1	53,94	151,8	-55,18
PPA	315,1	14,13	321,8	19,28	312,3	3,946
PPA FM	314,6	18,99	317,7	18,33	312,1	4,207

Heiztischmikroskopie

Ergänzend zu den DSC-Untersuchungen wurden die PE Proben mit Fluoreszenzpartikel (v. Projektpartner Litec LLL) einer heiztischmikroskopischen Untersuchung unterzogen. Diese Messungen dienen der bildgebenden Darstellung des Kristallisationsverhaltens. In Abbildung 21 ist die Abkühlung einer PE-Schmelze mit Fluoreszenzpartikel dargestellt. In einem Temperaturbereich von 125 – 120 °C erstarrt die Schmelze und bildet kristalline Bereiche aus. Da ausschließlich in Abständen von 5 K Aufnahmen gemacht wurden, ist das Erstarrungsverhalten im Bereich zwischen den beiden angegebenen Temperaturen nicht bekannt. Bei 120 °C ist erkennbar, dass in Bereichen ohne Fluoreszenzpartikel eine visuell bewertbar gleiche Kristallinität vorliegt, wie an dem Fluoreszenzpartikel. Daher

ist nicht davon auszugehen, dass die Fluoreszenzpartikel eine nukleierende Wirkung haben, was mit den Ergebnissen der DSC-Messungen übereinstimmt.

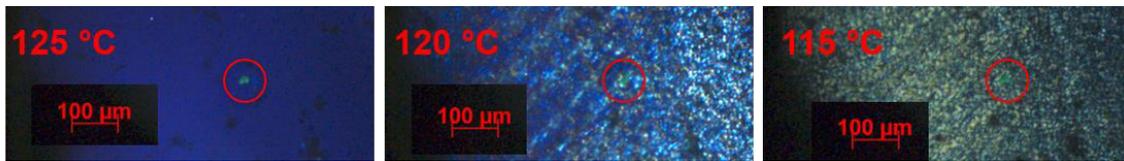


Abbildung 21: Abkühlung einer PE-Schmelze mit Fluorezenzpartikel beim Übergang von der Schmelze in den festen/glasartigen Zustand.

4.3 Hardwaresystem

Es wurde ein Hardwaresystem zur Aufnahme der Partikelmuster erfolgreich konzeptioniert und aufgebaut. Die Konzeption des Hardwaresystems basiert auf den durchgeführten Voruntersuchungen in Kapitel 3.7. Der Aufbau ist sowohl als CAD Modell wie auch als aufgebautes System in Abbildung 22 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das System vollständig eingehaust wurde, um den Bedingungen für Arbeitssicherheit zu genügen. Außerdem wurde ein Schutzschalter eingebaut, sodass die UV-Beleuchtung nur funktioniert, sofern die Türe der Einhausung geschlossen ist. Zur Festlegung der Arbeitsschutzmaßnahmen wurde ein externer Experte hinzugezogen. Beim Objektiv handelt es sich um das wechselbare C-Mount-Objektiv MV-O1614-3M-TA des Projektpartners Matrix Vision. Matrix Vision stellte ebenso die Kamera mvBlueFOX3-2064G-1111 zur Verfügung. Für die Beleuchtung wurden LED Stripes mit 365 nm und 395 nm beschafft. Durch einen Schalter an der Außenseite des Gehäuses kann zwischen beiden Wellenlängen gewechselt werden. Die Versuche wurden aufgrund der Ergebnisse in den Vorversuchen lediglich mit der 365 nm-Beleuchtung durchgeführt. Die Kameraeinheit, bestehend aus Kamera und Objektiv, Bandpassfilter sowie Beleuchtungsplatte, ist höhenverstellbar. Zur definierten Positionierung von Bauteilen kann eine bauteilspezifische 3D-Druck-Halterung verwendet werden. Die Halterungen können dabei ohne Verschraubung in der dafür vorgesehenen, quadratischen Vorrichtung eingelegt werden.

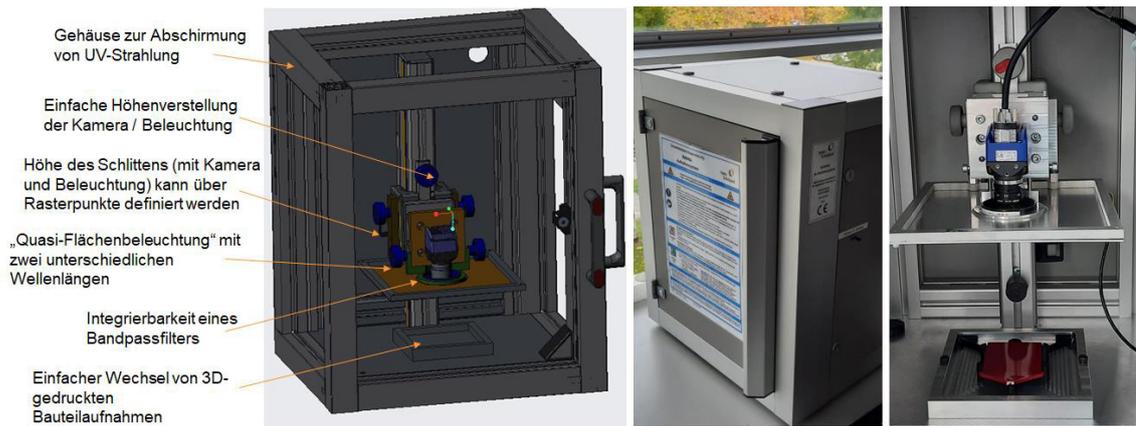


Abbildung 22: CAD-Modell und Foto des konzeptionierten und aufgebauten Hardwaresystems zur Aufnahme der Fluoreszenzpartikelmuster.

Für die Verwendung des entwickelten Verfahrens im industriellen Einsatz ist der Preis des Hardwaresystems ein ausschlaggebendes Kriterium. Nach der Durchführung und Auswertung erster Messreihen wurden daher auch alternative Kamerakomponenten recherchiert, die Einsparpotential bei den Hardwarekosten bieten. Der Fokus lag hierbei auf der Auswahl der Kamera und des Objektivs, da hier das Potential zur Kosteneinsparung größer ist als bei der Beleuchtung. Insgesamt wurden im Rahmen der Recherche sechs verschiedene Kameras und acht diverse Objektive unterschiedlicher Hersteller betrachtet. Die günstigste Kamera war die Raspberry Pi High Quality Camera für ca. 54 Euro. Es handelte sich somit um ca. ein Zehntel der Kosten der im Versuchsaufbau verwendeten Kamera. Die Raspberry Pi High Quality Camera hat 12,3 Megapixel und ein CS-Mount-Gewinde zur Anbringung von Objektiven. Sie hat außerdem eine USB- wie auch Ethernet-Schnittstelle. Das Objektiv, wie das PT3611614M10MP mit 10 Megapixel maximaler Auflösung, kostete weitere 54 Euro. Die ausführliche Vergleichstabelle aller Kameras und Objektive wird aufgrund des Umfangs und der Übersichtlichkeit nicht in diesem Bericht abgedruckt, kann aber auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Zwei Beispielaufnahmen, die mit dem Hardwareaufbau getätigt wurden, sind in Abbildung 23 zu sehen. In der linken Aufnahme wurde eine gelbe Kunststoffplatte aus PE fotografiert, in der rechten Aufnahme eine Stufenplatte aus PPA.

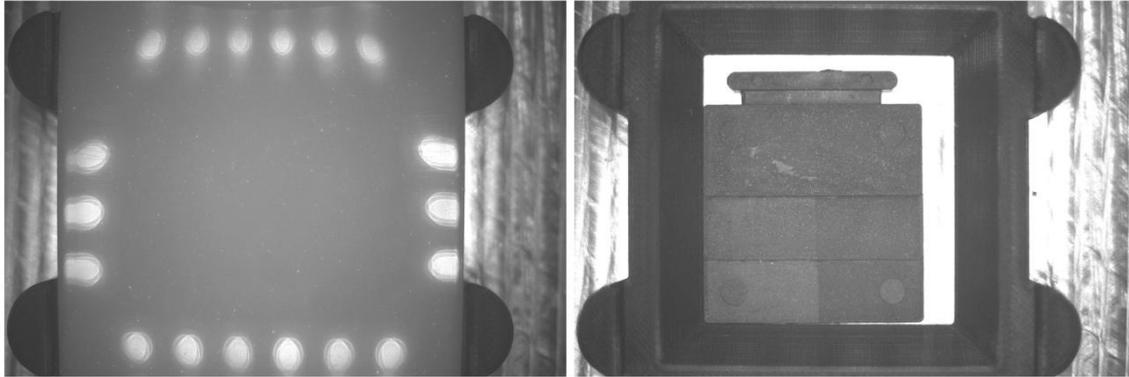


Abbildung 23: Mit dem aufgebauten Hardwaresystem getätigte Aufnahmen.

Bei beiden Aufnahmen zeigt sich, dass die Fluoreszenzpartikel an der Oberfläche gut sichtbar sind. Während im rechten Bild keine weiteren Auffälligkeiten zu sehen sind, können in der linken Aufnahme Spiegelungen der einzelnen LEDs beobachtet werden. Zur Optimierung der Aufnahmequalität könnte man zukünftig eine Diffusorplatte einsetzen oder eine diffuse Flächenbeleuchtung zukaufen. Die Region of Interest (RoI), die als Identifikationsfläche diente, wurde im Versuch daher entsprechend kleiner gewählt, sodass keine Spiegelungen in der RoI zu finden waren.

4.4 Identifikationsalgorithmus

Der im Projekt entwickelte Identifikationsalgorithmus ermöglicht es, anhand des individuellen Partikelmusters eines Bauteils dessen Seriennummer bzw. ID zuzuordnen. Der Algorithmus wurde iterativ entwickelt. Im Folgenden wird lediglich die finale Version des Identifikationsalgorithmus beschrieben, die auf einem Algorithmus zur “Blobb-Detection” basiert. Bei der Entwicklung einzelner Funktionen und Teilprogramme wurde Hahn-Schickard vom Projektpartner Detagto unterstützt.

4.4.1 Aufbau des Programms

Der Identifikationsalgorithmus umfasst drei Teilschritte:

- 1) Bildvorverarbeitung: Aus dem Originalbild wird eine Region of Interest (RoI) ausgeschnitten, die als Identifikationsfläche dient. Das darin zu sehende Partikelmuster wird mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden extrahiert.
- 2) Erstellen eines Beschreibungsvektors: Das Partikelmuster wird in einen Beschreibungsvektor überführt, welcher auch als “digitaler Fingerabdruck” des Partikelmusters verstanden werden kann. In diesem Schritt werden die im Bild enthaltenen Informationen zum Verteilungsmuster komprimiert. Für die spätere

Identifizierung genügt es, nur den Beschreibungsvektor anstatt des gesamten Bildes abzuspeichern.

- 3) Vergleich der Beschreibungsvektoren: Soll ein Bauteil identifiziert werden, wird der Beschreibungsvektor des zu identifizierenden Bauteils mit allen Vektoren in der Datenbank abgeglichen. Mit Hilfe einer geeigneten Metrik wird die Ähnlichkeit der Vektoren quantitativ erfasst. Dadurch lässt sich dem gesuchten Bauteil eine ID zuordnen.

Der schematische Aufbau des implementierten Programms ist Abbildung 24 zu entnehmen. Der Aufbau des Programms ist dabei auf Versuchszwecke ausgelegt. Für den Produktiveinsatz des Verfahrens in der industriellen Fertigung müsste die Software entsprechend angepasst werden. Die Implementierung erfolgte in Python.

Beim Ausführen des Programms werden zunächst alle Bilder in der Datenbank 1 geladen und nacheinander so prozessiert, dass jeweils der Beschreibungsvektor berechnet und in der Datenbank der Beschreibungsvektoren abgespeichert wird. Dieser Vorgang simuliert die Registrierung aller Bauteile. Nachdem alle Bauteile registriert wurden, werden im zweiten Schritt die Identifikationsprozesse durchgeführt. Hierfür wird jedes Bild in Datenbank 2 einzeln geladen und der jeweilige Beschreibungsvektor berechnet. Dieser wird mit allen aus Datenbank 1 berechneten Beschreibungsvektoren verglichen. Für jeden paarweisen Vergleich wird dabei ein quantitativer Wert bestimmt, der die Ähnlichkeit zwischen zwei Vergleichsvektoren beschreibt.

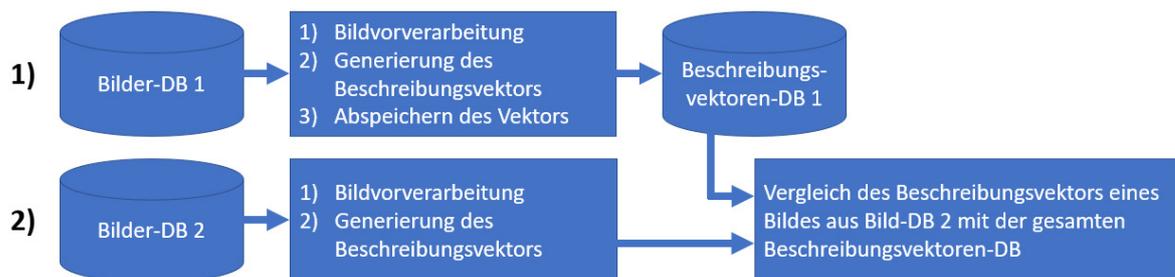


Abbildung 24: Schematischer Ablauf der implementierten Software.

Alle Teilschritte laufen im Programm direkt nacheinander ab, die Teilschritte werden im Folgenden zur besseren Verständlichkeit und Übersichtlichkeit jedoch nacheinander erläutert.

4.4.2 Bildvorverarbeitung

Abbildung 25 zeigt den schematischen Ablauf der Bildvorverarbeitung anhand der exemplarischen Aufnahme eines Kunststoffplättchens aus PE. Demnach wird aus der als

Graustufenbild eingelesenen Originalaufnahme zunächst ein Teilbereich ausgeschnitten, die RoI. Diese wurde so gewählt, dass die Spiegelungen der LEDs nicht in der RoI enthalten sind. Die Koordinaten des rechteckigen Bildausschnitts sind dabei fest definiert. Der Bildausschnitt umfasst bei den Kunststoffplatten aus PE 1500 x 900 Pixel, kann jedoch bauteilspezifisch angepasst werden. Im RoI-Bild wird daraufhin die Gradienten-Map bestimmt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist der Gradient bei Fluoreszenzpartikeln größer als beim Hintergrund. Indem das Gradienten-Bild mit Hilfe eines festen Graustufen-Schwellwerts binarisiert wird, verbleiben im Bild weiße Punkte lediglich dort, wo in der Originalaufnahme markante Fluoreszenzpartikel zu finden sind. Mithilfe der morphologischen Bildverarbeitungsoperation "Dilation" werden die weißen Punkte im Bild vergrößert. Letztlich wird die Position der einzelnen Punkte durch einen in OpenCV implementierten Algorithmus detektiert, der ursprünglich zur Erkennung von zusammenhängenden Bereichen ("Blobs") entwickelt wurde.

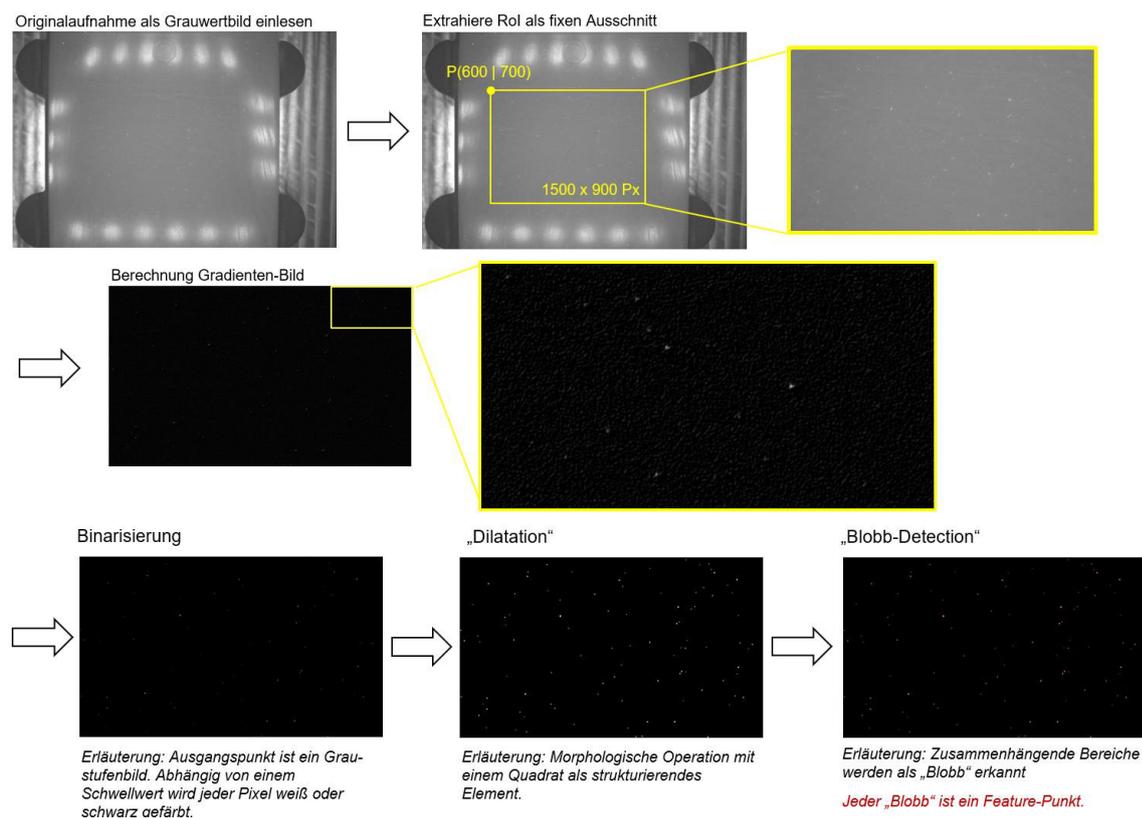


Abbildung 25: Darstellung der einzelnen Schritte im Rahmen der Bildvorverarbeitung.

Im Rahmen der Bildvorverarbeitung lassen sich die folgenden Parameter einstellen:

- Position und Größe der RoI
- Schwellwert bei Binarisierung: Bei einem Graustufenbild ist jedem Pixel ein ganzzahliger Graustufenwert zugeordnet, z. B. zwischen 0 (schwarzer Pixel) und

255 (weißer Pixel). Bei der Binarisierung wird ein Graustufen-Schwellwert angesetzt, wobei jeder Pixel mit einem geringeren Graustufenwert auf 0 (schwarz) gesetzt wird, jeder Pixel mit einer Intensität oberhalb dieses Schwellwerts hingegen auf 255 (weiß).

- Kernel bei Dilatation: Dilatation ist eine Bildverarbeitungsoperation, bei der die weißen Bereiche im binarisierten Bild mit Hilfe eines strukturierenden Elements vergrößert werden. Dazu wird ein Kernel definiert, wobei es sich um eine kleinere, strukturgebende Matrix handelt. Bei den durchgeführten Versuchen wurde meist ein 3x3 Pixel Kernel verwendet.

Die Parameter wurden bei jeder Messreihe manuell verändert und optimiert. Im Produktiveinsatz müsste die Parameteroptimierung jedoch automatisiert erfolgen, beispielsweise auch mit Ansätzen des maschinellen Lernens.

In Abbildung 26 sind in der RoI-Aufnahme eines exemplarischen Plättchens die detektierten Fluoreszenzpartikel ersichtlich. Links ist die originale RoI-Aufnahme dargestellt, im rechten Bild sind die detektierten Fluoreszenzpartikel mit einem roten Kreis kenntlich gemacht. Insgesamt wurden 95 Partikel detektiert. Unter Verwendung der zuvor im Projekt entwickelten Algorithmus-Versionen wurden im gleichen Bild maximal 40 Partikel detektiert. Bei der iterativen Optimierung des Identifikationsalgorithmus stand in erster Linie somit die Bildvorverarbeitung im Fokus, was zu einer signifikanten Steigerung der detektierten Fluoreszenzpartikel führte.

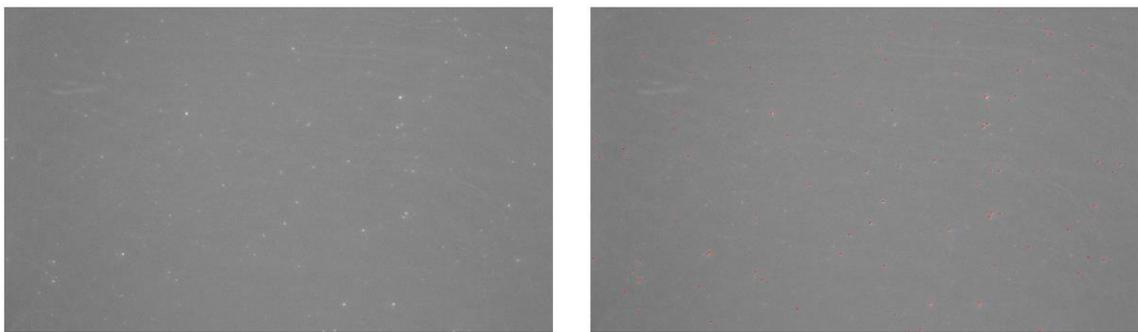


Abbildung 26: RoI-Aufnahme eines exemplarischen Plättchens ohne und mit rot eingezeichneten detektierten Fluoreszenzmarkern.

4.4.3 Beschreibungsvektor

Jeder detektierte Fluoreszenzpartikel besitzt eine x- und eine y-Koordinate. Anstatt des gesamten Bildes zu speichern, werden daher insbesondere die Koordinaten der detektierten Partikelpunkte als Beschreibungsvektor gespeichert. Neben den Koordinaten wurden zu jedem detektierten Blobb außerdem weitere Informationen abgespeichert, wie

z. B. dessen Größe. Diese Werte haben für den Identifikationsprozess, wie er bis dahin entwickelt wurde, jedoch keine Relevanz. Im Produktivbetrieb könnte daher darauf verzichtet werden.

Durch die Reduktion der abzuspeichernden Daten benötigte die Datenbank bei einer 18 Bauteile umfassenden Testdatenbank lediglich 142 Kilobytes, wohingegen die zugehörigen Bilder insgesamt 110 Megabytes Datenspeicher benötigten. Im vorliegenden Beispiel wurde der Speicherplatzbedarf somit auf weniger als ein Siebenhundertstel der originalen Datengröße reduziert. Der Speicherplatzbedarf des Beschreibungsvektors hängt in erster Linie von dessen Länge beziehungsweise von der Anzahl der detektierten Fluoreszenzpartikel ab.

4.4.4 Vergleich der Beschreibungsvektoren

Der Vergleich der Beschreibungsvektoren ist der eigentliche Identifikationsprozess, bei dem einem gesuchten Bauteil dessen ID zugeordnet wird. Dieser Prozess lässt sich in vier Schritte unterteilen:

- Rotations- und translationsinvariante Beschreibung des Fluoreszenzpartikelmusters: Der Beschreibungsvektor eines Bildes enthält die Koordinaten aller im Bild detektierter Partikelpunkte. Für jeden Punkt werden zunächst die drei nächsten Nachbarn sowie die Abstände zu diesen Punkten bestimmt. Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, werden außerdem die Winkel α_1 , α_2 sowie $\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2$ bestimmt. Durch die drei charakteristischen Abstände und Winkel wird jeder detektierte Fluoreszenzpunkt individuell beschrieben. Jedem Punkt im Bild wird somit ein Deskriptor zugeordnet, der gegenüber Translation und Rotation des Bildes invariant ist. Im Hinblick auf den Produktiveinsatz des Verfahrens könnten die Punkt-Deskriptoren eines Bildes im Zuge der Berechnung des Beschreibungsvektors ermittelt werden. Dadurch würde zwar die Rechenzeit zur Registrierung eines Bauteils erhöht werden, die Identifizierung würde jedoch deutlich beschleunigt werden, da die Berechnung der Punkt-Deskriptoren während des Identifikationsprozesses wegfallen würde. Im Projekt wurden im Beschreibungsvektor nicht die Punkt-Deskriptoren, sondern die jeweiligen Punkt-Koordinaten gespeichert, da es bei der Auswertung von Messreihen beispielweise zur Fehleranalyse notwendig war, die Punkte im Bild mit denen im Beschreibungsvektor verknüpfen zu können. Außerdem war die Performanz der

Identifikationsprozesse bei den durchgeführten Versuchen ohnehin zweitrangig.

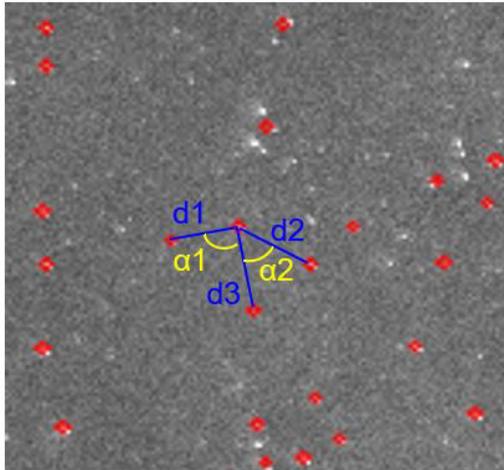


Abbildung 27: Skizze zur Berechnung eines Punktdeskriptors über die drei nächsten Nachbarn.

- Vergleich der Punkt-Deskriptoren und Bestimmung korrespondierender Punkte: Zum Vergleich der Partikelmuster in zwei Bildern werden die Punkt-Deskriptoren miteinander verglichen. Die Punkt-Deskriptoren sind dabei so angelegt, dass die Werte der Abstände und Winkel innerhalb eines Punkt-Deskriptors bereits der Größe nach sortiert vorliegen. Es seien d_{11} , d_{12} und d_{13} die drei Abstände und α_{11} , α_{12} und α_{13} die Winkel eines Punkt-Deskriptors sowie d_{21} , d_{22} und d_{23} die Abstände und α_{21} , α_{22} und α_{23} die Winkel eines anderen Punkt-Deskriptors. Dann gelten zwei Punkte als korrespondierend, sofern die Differenzen zwischen jeweils zwei zusammengehörenden Werten einen gewissen Schwellwert s unterschreitet:

$$|d_{1i} - d_{2i}| < s_d$$

$$|\alpha_{1i} - \alpha_{2i}| < s_\alpha$$

$$\text{für } i = \{1,2,3\}$$

Die beiden Schwellwerte sind weitere Parameter, die analog zur Diskussion in Kapitel 4.4.2 manuell bestimmt wurden. Beim Vergleich zweier Bilder wird letztlich die Anzahl der korrespondierenden Punkte bestimmt. Die Zuordnung der Bauteil-ID ergibt sich demnach durch den Beschreibungsvektor in der Datenbank, zu dem die meisten korrespondierenden Punkte gefunden werden.

4.5 Identifikationstests

Zur Durchführung der quantitativen Identifikationstests standen die Musterteile zur Verfügung, deren Herstellung in Abschnitt 4.1.3 beschrieben ist. Die Musterteile aus Abbildung 18 werden im Folgenden als Kunststoffplättchen bezeichnet. Die Musterteile

des Projektpartners Dr. Boy werden gemäß Kapitel 4.1.3 als Universalstäbe, Stufenplatten und Teile mit mikrostrukturierter Oberfläche bezeichnet.

Die Stufenplatten wurden in der Prozesslinie für spritzgegossene Schaltungsträger (Molded Interconnect Devices, MID) bei Hahn-Schickard prozessiert. Bei einigen der farbigen Kunststoffplättchen wurden diverse Oberflächenveränderungen verursacht, um die Robustheit des Verfahrens zu ermitteln. Zunächst wurde jedoch die Identifizierbarkeit der farbigen Kunststoffplättchen ohne Bearbeitung oder Veränderung der Oberfläche ausgetestet.

4.5.1 Identifikation unprozessierter Bauteile

Es wurden Testplättchen aller Farben aufgenommen und ausgewertet. Bei den blauen und schwarzen Plättchen waren jedoch kaum Fluoreszenzpartikel in den Bildern erkennbar. Dies deckt sich mit den Beobachtungen in Abbildung 19.

Rote Plättchen - Variation der Partikelkonzentration

In Abbildung 28 sind exemplarische Aufnahmen von zwei der roten Kunststoffplättchen zu sehen. Die linke Aufnahme zeigt das Bild des Teils mit Referenznummer 334, die rechte Aufnahme das Bild des Teils mit Nr.339. Beide Aufnahmen wurden bei gleichen Kamera- und Softwareeinstellungen vorgenommen.

Es ist ersichtlich, dass sich die Partikelkonzentration bei beiden Plättchen deutlich unterscheidet. Bei Bauteil Nr. 334 ist die Konzentration für eine ordnungsgemäße Identifizierung nicht ausreichend, bei Bauteil Nr. 339 hingegen schon. Eine vollständige Auswertung der roten Plättchen wurde daher nicht vorgenommen.

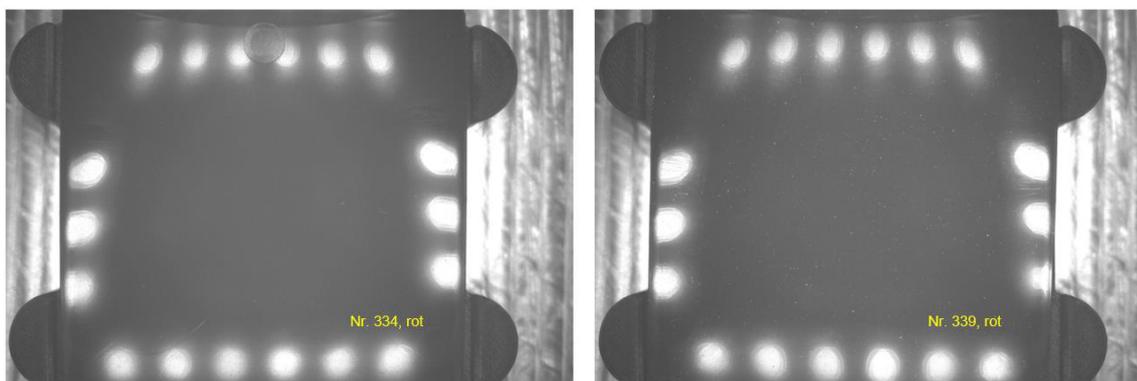


Abbildung 28: Exemplarische Aufnahmen von roten Plättchen.

Gelbe und violette Plättchen - Einfluss der Einfärbung

In Abbildung 29 ist jeweils eine Beispielaufnahme eines violetten und eines gelben Plättchens dargestellt. Im Vergleich zu Plättchens Nr. 332 ist die detektierte Partikeldichte in den anderen Aufnahmen der violetten Plättchen ähnlich gering. Auch hier ist die Einfärbung des Bauteils vermutlich der Grund, dass im Vergleich zu andersfarbigen Kunststoffplättchen eine geringere Partikeldichte detektiert wurde.

Das Bild des gelben Plättchens zeigt hingegen einen geringeren Kontrast zwischen den detektierten Fluoreszenzpartikeln und der Plättchenoberfläche. Dies lässt sich vermutlich damit erklären, dass die Emissionswellenlänge der Fluoreszenzpartikel und die Farbe der Plättchens nahe beieinander liegen. Beide Messreihen zeigen somit, dass die Bauteilfarbe einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der detektierten Partikel sowie auf den Kontrast der abgebildeten Partikel haben kann. Beides hat einen direkten Einfluss auf die Anzahl der korrespondierenden Punkte in zwei Beschreibungsvektoren und damit auf die Zuverlässigkeit der Identifikation.

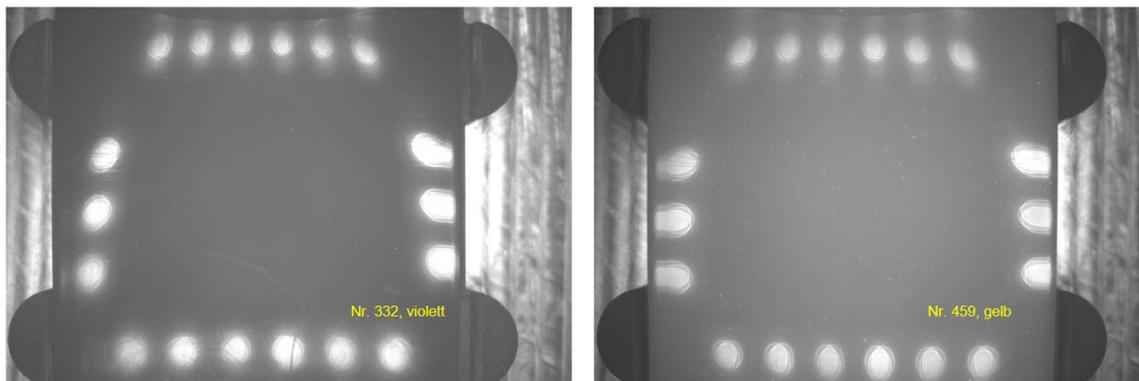


Abbildung 29: Exemplarische Aufnahmen eines violetten und eines gelben Plättchens.

Naturfarbene und grüne Plättchen – geeignete Partikelmuster

Bei den naturfarbenen Plättchen zeigt sich ein stark ausgeprägtes Partikelmuster, wie in der exemplarischen Aufnahme in Abbildung 30 zu sehen ist. In der gleichen Abbildung ist außerdem die Aufnahme eines grünen Plättchens erkennbar, bei dem die Dichte der detektierten Partikel zwar deutlich geringer ist wie beim naturfarbenen Musterteil, jedoch ist ein deutliches Fluoreszenzpartikelmuster erkennbar. Die Dichte der detektierten Partikel ist dabei bei allen anderen Musterteilen der beiden Farbe jeweils ähnlich.

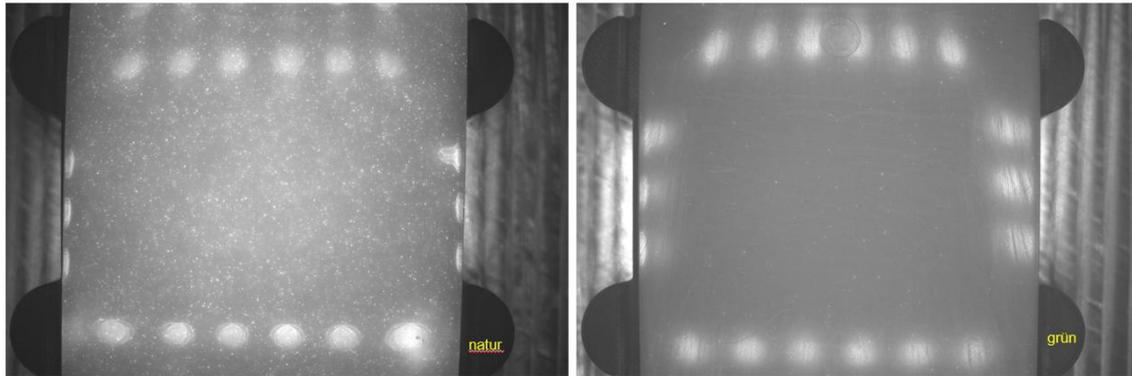


Abbildung 30: Exemplarische Aufnahmen eines naturfarbenen und eines grünen Plättchens.

Auswertung der farbigen Plättchen

In Tabelle 8 sind die Resultate der Auswertung für die grünen, gelben, violetten und naturfarbenen Plättchen dargestellt. Jede Messreihe umfasste demnach 16 bis 20 Bauteile. Die Resultate zeigen, dass alle Bauteile mit dem im Projekt entwickelten System zuverlässig identifiziert werden können, sofern die Partikelkonzentration sowie der Kontrast der Partikel zum Hintergrund ausreichend hoch sind.

Bei den gelben Plättchen wurden vier Musterteile nicht korrekt erkannt, wobei die fehlerhaften Identifikationen auf den schwachen Kontrast zwischen den Partikeln und der Plättchenoberfläche im Bild zurückzuführen ist. Bei den violetten Plättchen ist die äußerst geringe Partikelkonzentration der ausschlaggebende Grund für die geringe Identifikationsrate.

Tabelle 8: Resultate der Plättchen-Identifikationstests.

Messreihe	Anzahl Musterteile	Identifikationsrate	Anmerkung
Grün	16	100 %	
Natur	18	100 %	
Gelb	20	80 %	Schwacher Kontrast
Violett	20	50 %	Geringe Part.- Konzentration

Die Versuche zeigen, dass für eine hohe Zuverlässigkeit der Identifikationen eine Partikelkonzentration wie bei den naturfarbenen Plättchen eingestellt werden sollte. Zur Optimierung der Identifikationsrate könnte außerdem der Leuchtstoff im Hinblick auf dessen Emissionsspektrum in Abhängigkeit der Bauteilfarbe angepasst werden.

Auswertung der Stufenplatten, Universalstäbe und mikrostrukturierten Bauteilen

Abbildung 31 zeigt jeweils eine exemplarische Aufnahme der drei Bauteiltypen Stufenplatte, Universalstab und mikrostrukturiertes Bauteil. Bei allen Teilen sind die eingebrachten Fluoreszenzpartikel im Bild erkennbar.

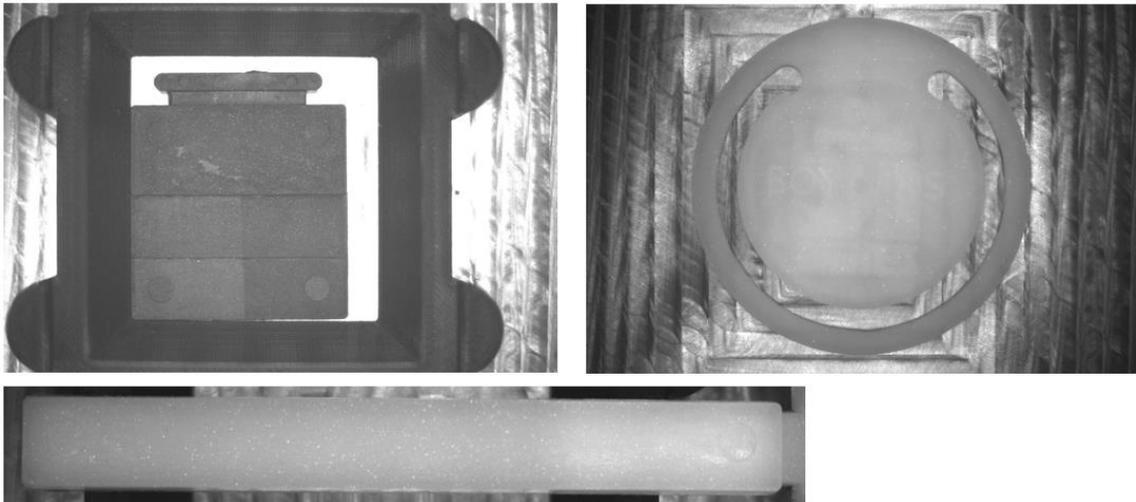


Abbildung 31: Exemplarische Aufnahmen einer Stufenplatte (oben links), eines Teils mit mikrostrukturierter Oberfläche (oben rechts) sowie eines Universalstabs (unten).

Bei den Identifikationstests der Stufenplatten wurden allen Teilen die korrekte ID zugeordnet, jedoch war es hierbei notwendig die Parametereinstellungen in der Software bauteilabhängig anzupassen. Wurde nur ein Parametersatz auf alle Bauteilaufnahmen der Stufenplatten angewendet, wurden je nach Parametersatz ein bis drei Teile nicht richtig identifiziert.

Bei den mikrostrukturierten Bauteilen wurde bei nur 30% der Teile die ID korrekt zugeordnet. Wie Abbildung 32 erkennen lässt, lässt sich dies auf verschiedene Gründe zurückführen. Einerseits variiert die Dichte der detektierten Fluoreszenzpartikel. Bei Bauteil Nr.405, das erfolgreich identifiziert werden konnte, sind deutlich mehr Partikel im Bild zu sehen als bei den anderen beiden Teilen. In den Aufnahmen von Nr.402 ist außerdem ersichtlich, dass die Toleranz bei der Positionierung einiger Teile im Verhältnis zur Verfügung stehenden RoI zu groß ist. Bei Bauteil Nr.402 beträgt die Verschiebung ca. 13% der RoI-Größe. Des Weiteren lässt sich insbesondere bei den Aufnahmen von Teil Nr.401 erkennen, dass die detektierten Fluoreszenzpartikel leicht unscharf sind und

der Kontrast für eine zuverlässige Identifizierung demnach nicht ausreicht.

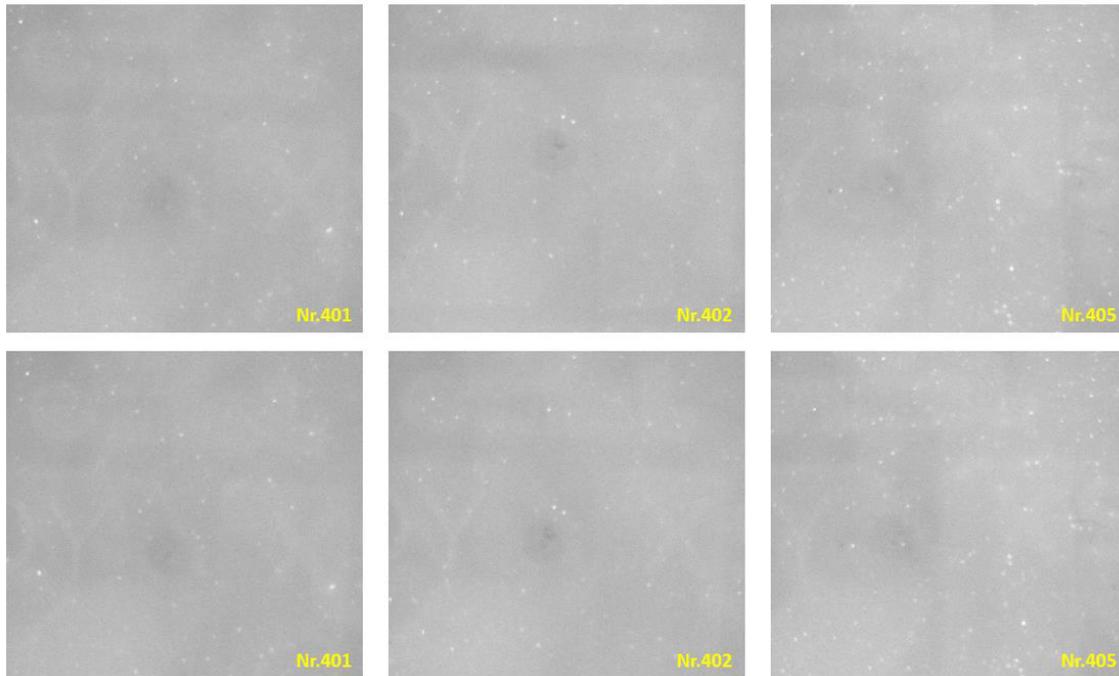


Abbildung 32: Exemplarische ROI-Aufnahmen der Teile mit mikrostrukturierter Oberfläche.

Auch bei den Universalstäben reagiert die Identifikation sensibel auf Positionstoleranzen der Teile in y-Richtung, da die ROI in y-Richtung lediglich 160 Pixel groß ist. Daher wurde die Position der Teile softwareseitig korrigiert, bevor die Auswertung durchgeführt wurde. Unter Verwendung der daraus resultierenden Aufnahmen konnten im Versuch allen ausgewerteten Universalstäbe die korrekte ID zugeordnet werden.

Die Auswertungen der Stufenplatten, Universalstäbe und mikrostrukturierten Teilen decken sich hinsichtlich der Beobachtungen und Schlussfolgerungen demnach mit den Ausführungen bei den Identifikationstests der Kunststoffplättchen aus PE.

4.5.2 Identifikation nach Oberflächenveränderung

Einige der verschiedenfarbigen Kunststoffplättchen wurden Oberflächenveränderungen unterzogen, um die Robustheit dahingehend zu ermitteln. Dazu wurde die Oberfläche von naturfarbenen Plättchen zerkratzt oder bemalt, um insbesondere mechanische Veränderungen und Verschmutzungen zu simulieren. Es wurde darüber hinaus der Einfluss leicht unscharfer Bauteile untersucht, indem die Fokuseinstellung am Objektiv leicht verstellt wurde.

In Abbildung 33 ist für eine Auswahl von vier Plättchen die Aufnahme der ROI beispielhaft dargestellt. In allen Aufnahmen ist die deutliche Verschiebung der Plättchen

im Bild zu erkennen. Diese Toleranzen bezüglich Translation und Rotation werden vom Algorithmus weitestgehend ausgeglichen. Des Weiteren sind die Aufnahmen in der unteren Bildreihe unschärfer als in der oberen Bildreihe, was sich auch auf den Kontrast der detektierten Partikel auswirkt. Zwischen der ersten und zweiten Aufnahme der Bauteile wurden außerdem folgende Veränderungen vorgenommen:

- Bauteil Nr. 775: Einbringen von wenigen, leichten Kratzern
- Bauteil Nr. 777: Einbringen deutlich sichtbarer Kratzen, bemalen der Oberfläche
- Bauteil Nr. 781: Bemalen der Oberfläche
- Bauteil Nr. 782: Einbringen deutlich sichtbarer Kratzer

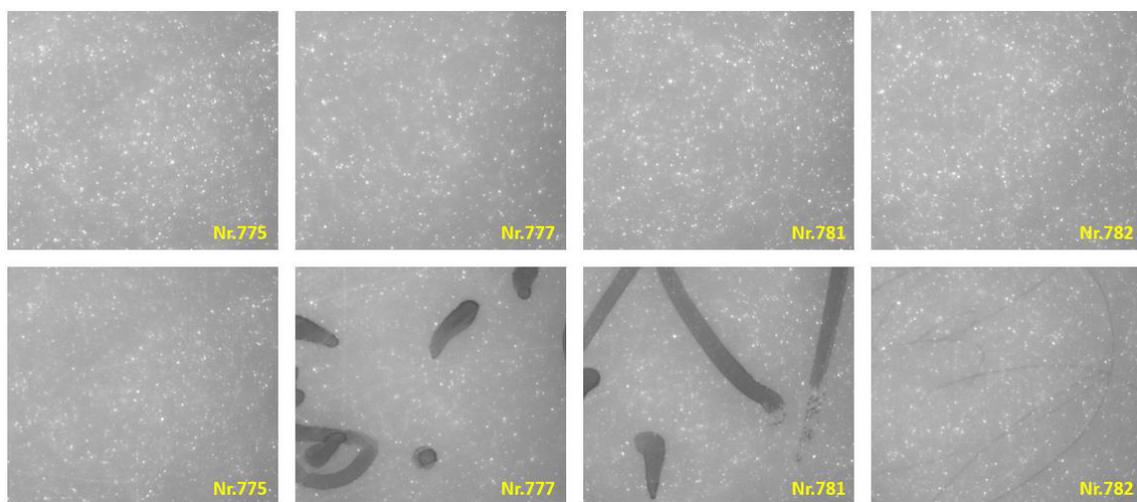


Abbildung 33: Exemplarische Aufnahmen von Plättchen vor und nach Veränderung der Oberfläche.

Insgesamt wurden bei 13 Bauteilen Oberflächenveränderungen vorgenommen. Bei 11 der 13 Testplättchen wurde mit Hilfe des entwickelten Algorithmus die ID korrekt zugeordnet. Dabei wurden Softwareparameter gegenüber der Messreihe der unprozessierten Plättchen neu angepasst. Lediglich bei den Bauteilen Nr.777 und Nr.783 wurde die ID nicht korrekt zugeordnet. Bei Plättchen Nr.783 sind die Oberflächenveränderungen dabei sehr ähnlich zum hier dargestellten Bauteil Nr.777. Auch bei Nr.783 wurden demnach deutliche Kratzer eingebracht und die Oberfläche bemalt. Neben den Bauteilen Nr.777, 781 und 783 wurden keine weiteren Plättchen bemalt, sondern lediglich Kratzer eingebracht.

Die Versuche zeigen, dass die Identifikation eines Bauteils trotz moderater Oberflächenveränderungen wie Kratzer, leicht unscharfen Aufnahmen und teils auch Verschmutzungen gelingen kann. Zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse könnte

zukünftig jedoch die Bildvorverarbeitung weiter optimiert werden und hierbei insbesondere die automatische, dynamische Anpassung der Softwareparameter. In den durchgeführten Versuchen wurden bei allen Musterteilen einer Messreihe die gleichen Softwareparameter gewählt.

4.5.3 Traceability in der MID-Prozesskette

Das Verfahren soll die Traceability von Kunststoffkomponenten entlang einer Produktionslinie ermöglichen. Im Rahmen des Projekts wurde daher untersucht, inwiefern mit dem entwickelten Identifikationsverfahren die Traceability entlang der Prozesskette zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger (engl. Molded Interconnect Devices, MIDs) erreicht werden kann. Als Testbauteile dienten die Stufenplatten. Es wurden 30 Stufenplatten zunächst unmittelbar nach dem Spritzgießen aufgenommen, das heißt ohne weitere Bearbeitung. Anschließend wurden die Teile in der MID-Linie prozessiert und erneut aufgenommen. In Abbildung 34 sind zwei Aufnahmen einer Stufenplatte zu sehen. Die linke Aufnahme wurde vor, die rechte Aufnahme nach der Prozessierung getätigt. In der rechten Aufnahme sind daher die metallisierten Strukturen der Leiterbahnen und Forschungseinrichtungs-Logos zu sehen. Das elektronische Layout hat keine Funktion.

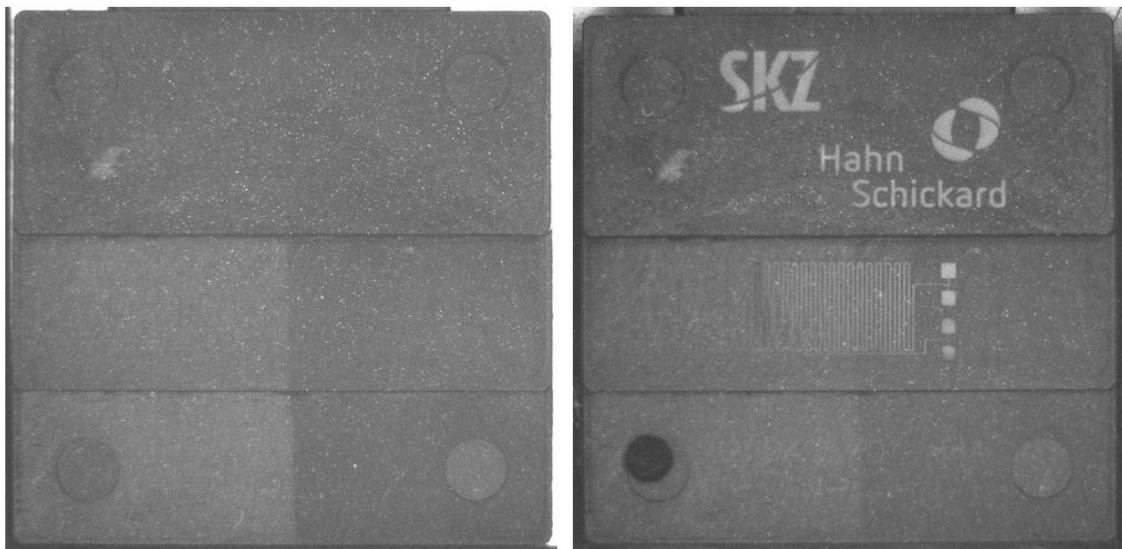


Abbildung 34: Aufnahmen einer Stufenplatte vor und nach der Prozessierung in der MID-Linie.

Da bei den zwei Aufnahmen der Stufenplatten vor und nach der Prozessierung der Abstand zwischen Kamera und Stufenplatte unterschiedlich war, konnte der im Projekt entwickelte Identifikationsalgorithmus nicht angewendet werden. Die Analyse der Bilder

zeigt jedoch, dass markante Fluoreszenzpartikel sowohl vor als auch nach der Prozessierung gut erkennbar sind. Dies ist in den vergrößerten Bildausschnitten in Abbildung 35 zu sehen. Im linken Bild sind zwar mehr Fluoreszenzpartikel erkennbar, jedoch sind die hellsten und damit markantesten Partikel in beiden Bildern enthalten. Die gelben Linien verbinden zur besseren Visualisierung solche Partikel, die in beiden Bildern zu sehen sind.

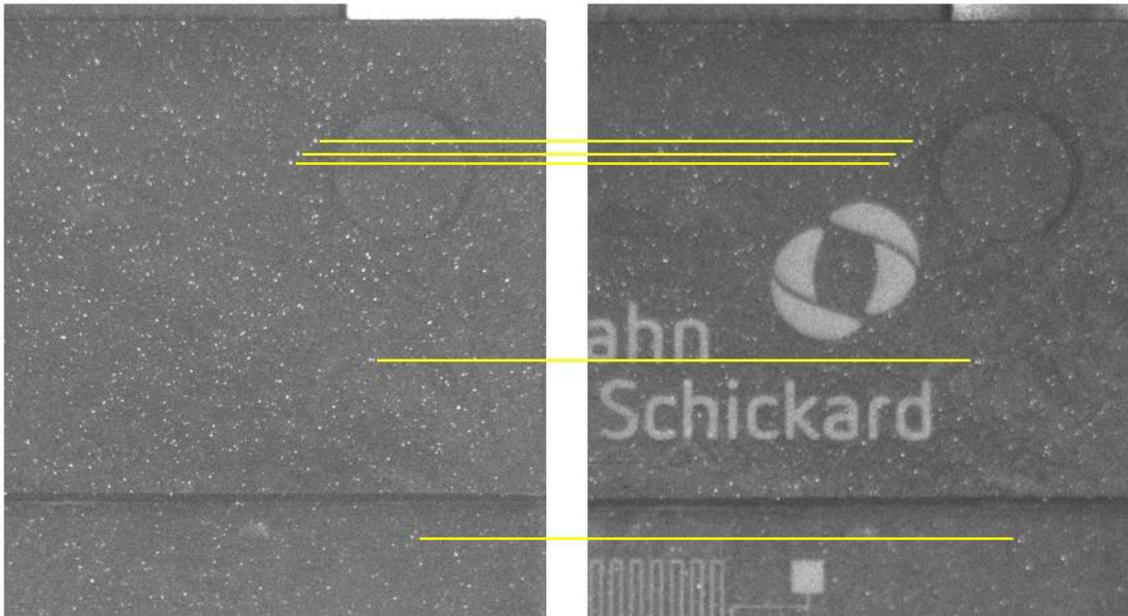


Abbildung 35: Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt, dass markante Fluoreszenzpartikel auch nach der Prozessierung in der MID-Prozesskette erhalten bleiben. Fünf Beispiele dafür sind durch die gelben Linien kenntlich gemacht.

Bei den unprozessierten Stufenplatten in Kapitel 4.5.1 konnte allen Teilen die richtige ID zugeordnet werden konnte, nachdem die Parametereinstellungen in der Software für einzelne Teile individuell gewählt wurden. Es wird daher davon ausgegangen, dass der entwickelte Identifikationsalgorithmus auch mit den Bildern nach der Prozessierung die richtigen IDs zuordnen könnte. Für zukünftige Arbeiten könnte der Algorithmus so weiterentwickelt werden, dass er auch invariant gegenüber (einer gewissen) Skalierung ist und die Höhe der Kameraeinstellung keinen derart großen Einfluss mehr hat.

5 Zusammenfassung

Das Projektziel der Entwicklung eines universell einsetzbaren T&TV-Verfahrens für Kunststoffbauteile mithilfe fluoreszierender Partikel wurde erreicht. Die Einarbeitung anorganischer Fluoreszenzpartikel in verschiedene Kunststoffe (Polyethylen, Polypropylen, Polyamid 12, Polyphthalamid) mithilfe einer Compoundieranlage konnte realisiert und in einem zweistufigen Compoundierprozess auf 0,5 Gew.% Partikelanteil eingestellt werden. Die Fluoreszenzpartikel mussten in Abhängigkeit des einzusetzenden Polymers mit einer inerten Oberfläche ausgestattet sein, um eine Polymerdegradation zu vermeiden. Die hergestellten Compounds wurden als Masterbatch für das Spritzgießen verwendet, um Fluoreszenzpartikel im ppm-Bereich in das Bauteil einzubringen. Die Partikel konnten durch Bestrahlung mit UV-Licht einer Wellenlänge von 365 nm sichtbar gemacht und visuell detektiert werden. Die erforderliche Konzentration an Fluoreszenzpartikeln zur ausreichenden Detektion in einem Bauteil war abhängig von der Farbe des Kunststoffbauteils. In dunkel gefärbten Bauteilen (schwarz, dunkelblau) waren deutlich weniger Partikel auf der Oberfläche erkennbar als in hell gefärbten Bauteilen (gelb, silbermetallic). Die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe wurden durch die Fluoreszenzpartikel nicht beeinträchtigt. Mit steigender Konzentration ist allerdings davon auszugehen, dass sich die ursprünglichen Materialeigenschaften des nicht additivierten Polymers verändern. Mit dem im Projekt konzeptionierten und aufgebauten Hardwaresystem konnten die Partikelmuster für Identifikationstests aufgenommen werden. Außerdem wurde ein Bildverarbeitungsalgorithmus entwickelt, mit dem die Fluoreszenzpartikel im Bild detektiert und in einen "digitalen Fingerabdruck" des Partikelmusters überführt wurden. Dieser Kompressionsschritt führte zu einer Verringerung der abzuspeichernden Datenmenge um mehrere Größenordnungen. Verschiedene Messreihen zeigten, dass mit dem Bildverarbeitungs- und Identifikationsalgorithmus die Identifikation von Bauteilen anhand des individuellen Partikelmusters möglich ist. Die zuverlässige Zuordnung der Bauteil-ID funktioniert dabei auch noch bei moderaten Veränderungen der Oberfläche, wie zum Beispiel bei Kratzern oder Verschmutzungen. Durch die Prozessierung von Musterteilen entlang der MID-Prozesskette konnten darüber hinaus Erkenntnisse für den Produktiveinsatz gesammelt werden.

6 Umsetzung der Forschungsergebnisse

6.1 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die im Projektantrag dargestellten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden planmäßig durchgeführt. Bereits während der Projektlaufzeit wurde das Thema bei verschiedenen Fachveranstaltungen und in diversen Vorträgen vorgestellt. Eine Auflistung der während der Projektlaufzeit durchgeführten Transfermaßnahmen ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
PbA	Diskussion der Vorgehensweise und Ergebnisse	1. Sitzung: Projektvorstellung	06.05.2020
		2. Sitzung: Zwischenstand	26.11.2020
		3. Sitzung: Zwischenstand	14.10.2021
		4. Sitzung: Ergebnisvorstellung	31.03.2022
Austausch mit Unternehmen	Informationsaustausch	➤ Direkte Gespräche mit Unternehmen außerhalb des PbA	Kontinuierlich
		➤ Fachbeiratssitzungen des SKZ	06.06.2019/28.05.2020
Akademische Ausbildung	Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses	Hiwi-Tätigkeiten	Kontinuierlich
Fachvorträge und Poster	Wissenschaftlicher Diskurs, Projektvorstellung	Technologietag SKZ	30.06.2022
Publikationen	Bekanntmachung des Projekts	Pressemitteilungen	Q2 2020
		➤ https://www.hahn-schickard.de/projekt-detail/bauteil-identifizierung-zur-einzelteilverfolgung-anhand-fluoreszierender-additive-in-kunststoffbauteilen-bianka (zuletzt geprüft am 25.09.2022)	
		➤ Industrielle Automation, September 2022	Q3 2022

Durch Fachvorträge und Treffen des projektbegleitenden Ausschusses war ein Ergebnistransfer zu KMU bereits während der Projektlaufzeit gewährleistet. Ziel der Projekttreffen war die kontinuierliche Information der beteiligten Unternehmen sowie die Diskussion der Vorgehensweise und erzielten Ergebnisse. Dies diente einerseits zur Absicherung der Praxisrelevanz der durchgeführten Arbeiten und ermöglichte den Unternehmen andererseits die direkte und zeitnahe Nutzung der Forschungsergebnisse.

Durch die Vorstellung der Projekte auf der Internetseite von Hahn-Schickard, sowie der Veröffentlichung in „Industrielle Automation“ wurde die Öffentlichkeit über die Forschungstätigkeit informiert.

Die Vorstellung der Forschungsarbeiten sowie detaillierter Forschungsergebnisse auf Fachtagungen und in Arbeitskreissitzungen stellte die Bekanntmachung des Forschungsvorhabens und den Wissenstransfer gegenüber dem Fachpublikum aus der Kunststoffbranche sicher.

Darüber hinaus wurde das Forschungsvorhaben Interessenten aus Industrie und Forschung auch außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses in persönlichen Gesprächen vorgestellt und dessen Inhalte diskutiert.

Die nach der Projektlaufzeit bereits durchgeführten und noch geplanten Maßnahmen sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Geplante Transfermaßnahmen, die nach Ende der Projektlaufzeit erfolgten bzw. geplant sind

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Wissenstransfer	Abschlussbericht bestellbar über die Homepage der Forschungseinrichtung und verfügbar als ISBN	Nach Akzeptanz des Schlussberichts durch den Fördermittler
Beratung von Unternehmen	Wissenstransfer	➤ Direkte Gespräche mit Unternehmen ➤ Beratungsangebote	Ab Projektabschluss
Aus- und Weiterbildung	Weiterbildung von Mitarbeitern	SKZ Seminare und Lehrgänge	Ab Projektabschluss
Akademische Ausbildung	Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses	Lehrveranstaltungen der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, der FH Würzburg-Schweinfurt sowie der Universität Stuttgart	Ab Projektabschluss
Prüfdienstleistungen	Wissenstransfer	Übernahme der entwickelten Prüfmethodik und -bewertung in das SKZ-Dienstleistungsangebot	Ab Projektabschluss
Publikationen	Bekanntmachung der Projektergebnisse	➤ Kurzzusammenfassung auf der Homepage der Forschungseinrichtung(en) ➤ Pressemitteilungen in verschiedenen Zeitschriften der Kunststoffbranche ➤ Jahresbericht der Forschungseinrichtung(en)	04/2022 Ab Projektabschluss
Fachvorträge und Poster	Wissenschaftlicher Diskurs	Fachtagungen	Bis 2 Jahre nach Projektabschluss

7 Verwendung der Zuwendung

7.1 Hahn-Schickard

7.1.1 Zuwendung

Alle vom Projektträger genehmigten finanziellen Mittel wurden für die im Antrag vorgesehenen und beantragten Bestimmungen verwendet. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens daher notwendig und angemessen.

7.1.2 Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Die Personalzuwendungen wurden eingesetzt, um das wissenschaftliche und technische Personal zu finanzieren. Die Hauptaufgaben des wissenschaftlichen Personals bestanden in der Gesamtkoordination des Forschungsvorhabens, der Konzeption und Inbetriebnahme des Hardwaresystems, der Entwicklung und Implementierung des Algorithmus sowie der Software sowie der Konzeption und Auswertung der Messreihen. Darüber hinaus kümmerte sich das technische Personal insbesondere um die mechanische und elektronische Fertigung beziehungsweise Montage des Hardwareaufbaus, die Aufnahme von Bauteilen im Zuge von Messreihen und die Prozessierung von Musterteilen in der MID-Prozesskette. Die Mittelabrufe waren zur Erreichung der Ziele angemessen und erforderlich. Die erzielten Ergebnisse stehen im Einklang mit den laut Antrag vorgesehenen Arbeiten. Insgesamt wurde wissenschaftliches Personal mit 28 Personenmonaten eingesetzt.

7.2 SKZ

7.2.1 Zuwendung

Alle vom Projektträger genehmigten finanziellen Mittel wurden für die im Antrag vorgesehenen und beantragten Bestimmungen verwendet. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens daher notwendig und angemessen.

7.2.2 Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Die Personalzuwendungen wurden eingesetzt, um das wissenschaftliche und technische Personal zu finanzieren. Die Hauptaufgaben des wissenschaftlichen Personals bestanden in der Gesamtkoordination des Forschungsvorhabens, der Auswahl der zu verwendenden

Rohstoffe, der Erstellung von Rezepturen und Festlegung der Verfahrensparameter, der Auswahl geeigneter Prüfmethode sowie der Auswertung der Versuchs- und Prüfergebnisse. Darüber hinaus kümmerte sich das technische Personal insbesondere um die Durchführung der Einarbeitungsversuche im Labor- und Technikumsmaßstab, die Prüfkörperherstellung mittels Minilab und Spritzgießen, die Durchführung der Prüfungen und deren Dokumentation. Die Mittelabrufe waren zur Erreichung der Ziele angemessen und erforderlich. Die erzielten Ergebnisse stehen im Einklang mit den laut Antrag vorgesehenen Arbeiten. Insgesamt wurde wissenschaftliches Personal mit 20,65 Personenmonaten eingesetzt.

7.2.3 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Der Einsatz von Geräten nach Einzelansatz B des Forschungsplans war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen – es sind daher keine Kosten für den Einsatz von Geräten angefallen. Sämtliche Untersuchungen konnten mit dem am SKZ vorhandenen Equipment umgesetzt werden.

7.2.4 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Die Leistungserbringung durch Dritte nach Einzelansatz C des Finanzierungsplans war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen – es sind daher keine Kosten für Leistungen Dritter angefallen. Sämtliche Untersuchungen konnten durch die Forschungsstelle SKZ abgedeckt werden.

8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU und Angaben zur Finanzierbarkeit

Die Forschungsergebnisse bilden eine umfangreiche Studie mit tiefgehenden Erkenntnissen zur Bauteilrückverfolgung mithilfe fluoreszierender Partikel. Der Fokus lag auf der Auswahl geeigneter Materialien, relevanten Partikelkonzentrationen, der Erstellung eines zuverlässigen Algorithmus sowie der Auslegung der entsprechenden Hardware.

Die generierten Ergebnisse dienen sowohl den Materialherstellern von Fluoreszenzpartikeln, Compoundeuren sowie produzierenden Spritzgießbetrieben. In diesen Bereichen finden sich sehr viele kleine und mittelständische Unternehmen wieder (vgl. projektbegleitender Ausschuss), die von den dargestellten Forschungsergebnissen profitieren. Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten erweitern den bisherigen Wissensstand und zeigen die Möglichkeiten und Chancen der Einzelteilrückverfolgung mithilfe fluoreszierender Partikel auf. Für viele KMU dienen diese Erkenntnisse als Entscheidungshilfe hinsichtlich Neuinvestitionen in Maschinen und Gerätschaften, sowie bei einer grundsätzlichen strategischen Ausrichtung potenziell neuer Geschäftsfelder. Betriebe, die bereits über grundlegendes Know-how und eine entsprechende maschinelle Ausrüstung im Bereich Compoundieren und Spritzgießen verfügen, können die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse direkt umsetzen.

Durch den Einsatz von fluoreszierenden Partikeln in Kunststoffen können Bauteile ab dem ersten Prozessschritt identifiziert und im Rahmen des produzierenden Betriebs zurückverfolgt werden. Die fluoreszierenden Partikel werden in Form von Masterbatches im Spritzgießprozess verarbeitet und sind im Bereich weniger ppm im Bauteil vorhanden. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Materialkosten bleiben aufgrund der geringen Partikelkonzentrationen niedrig. Von Seiten der Masterbatchherstellung und Spritzgießverarbeitung sind keine speziellen maschinellen Ausrüstungen notwendig, wodurch die Materialien ohne Probleme in das Produktportfolio von Compoundeuren oder in den Spritzgießprozess implementiert werden können.

Die entwickelten Hardware- und Software-Komponenten können in ein marktfähiges und industriell einsetzbares System zur Bauteil-Traceability einfließen. Der modulare Ansatz erlaubt es dabei, einzelne Komponenten zu optimieren. Dadurch resultiert ebenso die Möglichkeit, dass auf Basis der Vorarbeiten im Projekt für verschiedene Bereiche und

Branchen individuelle Track&Trace-Lösungen marktreif entwickelt werden. Demensprechend können sich zukünftig verschiedene Anbieter von Track&Trace-Verfahren oder von Computervision-Systemen mit einer auf BIANKA aufbauenden Lösung am Markt platzieren.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002
- [2] B. Wigger, M. Barth, " Teilvorhaben Hahn-Schickard: Abschlussbericht zum BMBF-Verbundvorhaben Track4Quality", Projekt Nr. 16ES0430, TIB Hannover, 2018.
- [3] FAZ, "54 Milliarden Euro Schaden durch gefälschte Produkte", 26.01.2019, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/54-milliarden-euro-schaden-durch-produktpiraterie-16009251.html>
- [4] A. F. Smith, P. Patton, S. E. Skrabalak, "Plasmonic Nanoparticles as a Physically Unclonable Function for Responsive Anti-Counterfeit Nanofingerprints", *Advanced Functional Materials*, vol. 26, no. 9, p. 1315–1321, 03/2016
- [5] J. Kim, J. M. Yun, J. Jung, H. Song, J.-B. Kim, H. Ihee, "Anti-counterfeit nanoscale fingerprints based on randomly distributed nanowires", *Nanotechnology*, vol. 25, no. 15, p. 155303, 2014
- [6] Fraunhofer IPM, "Fälschungssichere Tickets durch Marker-Pigmente," 08/2017, <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/PK/OOA/Secure-Stamp-faelschungssichere-Tickets.pdf>
- [7] J. D. R. Buchanan et al., "Forgery: Fingerprinting' documents and packaging", *Nature*, vol. 436, no. 7050, pp. 475–475, 07/2005
- [8] B. Wigger, T. Meissner, A. Förste, V. Jetter, A. Zimmermann, "Using unique surface patterns of injection moulded plastic components as an image based Physical Unclonable Function for secure component identification", *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 4738, 03/2018
- [9] B. Wigger, I. Koinzer, T. Meißner, M. Barth, A. Zimmermann, "Robust and fast part traceability in a production chain exploiting inherent, individual surface patterns", eingereicht bei *Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 02/2019.
- [10] Jochen Möblein, "Optische Marker für Fasern und Textilien," Präsentation beim Forum Funktionalisierung in Hohenheim, 20.01.2016.
- [11] Grafe Advanced Polymers GmbH, "GRAFE Masterbatch - Compounds", letzter Zugriff am 30.07.2019, <https://www.grafe.com/de/aktuelles/presse/866-plagiatschutz-auf-knopfdruck-detektierbar>

- [12] Hahn-Schickard, "Projekt Control+", letzter Zugriff am 30.07.2019, <https://www.hahn-schickard.de/projekte-publikationen/projekte/control/>
- [13] Hahn-Schickard, "Steuerungsvorrichtung für eine Fertigungsanlage, Nachverfolgungsvorrichtung, Fertigungsdatenbestimmer, Methoden und Computerprogramm", Patentanmeldung eingereicht am 06.02.2019
- [14] B. Wigger et al., "Label-/tag-free traceability of electronic PCB in SMD assembly based on individual inherent surface patterns," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 07/2018.
- [15] B. Wigger, "Inhärente Oberflächenstrukturen als Identifikationsmerkmal zur markierungsfreien Einzelteilverfolgung", 2020, Universität Stuttgart
- [16] Hollemann, Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage, de Gruyter, S.1252 (ISBN 978-3-11-017770-1)
- [17] Rausch, Das Periodensystem der Elemente online, letzter Zugriff am 23.09.2022
- [18] Menges, Haberstroh, Michaeli, Schmachtenberg; Menges Werkstoffkunde Kunststoffe; 6. Auflage, Hanser, S.426 (ISBN 978-3-446-42762-4)
- [19] WIS Kunststoffe, WISsensmatrix, http://www.wiskunststoffe.de/content/WIS_8209_Polymermatrix-41s.html, letzter Zugriff am 29.09.2022
- [20] Handbuch Kunststoff-Additive, 4. Vollständig neu überarbeitete Auflage, S. 684, ISBN 978-3-446-22352-3