

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

KI-kognitionsunterstützendes Assistenzsystem zur Inprozesskontrolle in der Fertigung (KIKA-IPK); Teilprojekt: ML-basierte visuelle Prozesskalibrierung und Regelung

in der Fördermaßnahme

BMBF: Lernende Produktionstechnik – Einsatz künstlicher Intelligenz
(KI) in der Produktion (ProLern)

Autor

Relimetrics GmbH
Volmerstrasse 9
12489 Berlin

Ender Tasdelen
ender.tasdelen@relimetrics.com

Projektlaufzeit: 01.11.2021 – 28.02.2025
Erstellungsdatum: 26.07.2025
Förderkennzeichen: 02P20A144

Projektpartner

DiHeSys Digital Health Systems GmbH
PSI Software SE
Hamilton Freiburg GmbH (ehemals BiofluidiX)
TU Berlin | Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)
Gestalt Automation GmbH | Gestalt Robotics
GEFERTEC GmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzbericht	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	4
II.	Wesentliche Ergebnisse im Überblick.....	4
II.1.1	KI-gestützte Tropfenanalyse	4
II.1.2	Neues Bildgebungsverfahren für ODF	4
II.1.3	Integration von Kalibrierungs- und Regelalgorithmen	5
II.1.4	Cloudbasierte, skalierbare Prozessintegration.....	5
II.1.5	Zusammenarbeit und Transfer.....	5
II.1.6	Fazit.....	5

I. Teil I Kurzbericht

Das Forschungsprojekt KIKA-IPK hat skalierbare KI-Clouddienste mit Assistenzwerkzeugen entwickelt, die selbstständig lernen, wie Bildmerkmale und Prozesseigenschaften zusammenhängen. Dabei wurde das Erfahrungswissen von Maschinenbedienern durch maschinelle Lernverfahren modelliert. Durch Nutzerfeedback und Anomalieerkennung konnten auch bei vergleichsweise wenigen Trainingsdaten KI-Modelle trainiert werden.

Als Ergebnis entstanden in zwei Anwendungsfällen (3D-Metalldruck und Medikamentendruck) Assistenzsysteme, die optische Qualitätsmerkmale und Prozessgrößen während der Herstellung zu analysieren, um ressourceneffizientere Prozessparameter zu ermöglichen. Dies ist besonders geeignet für Kleinserien- und Einzelfertigung.

Insgesamt wurden vier konkrete Ergebnisse erreicht: die Entwicklung von drei KI-basierten Assistenzsystemen sowie einer dazugehörigen individuellen Cloudplattform zur Anbindung der KI-Dienstleister an die Industriepartner. Die Ergebnisse zu den jeweiligen Anwendungsfällen werden im Folgenden einzeln beschrieben:

Anwendungsfall Medikamentendruck

Die im Projekt entwickelten KI-Dienste und Werkzeuge wurden beim personalisierten Medikamentendruck praxisnah getestet. Dabei wurden die Möglichkeiten gezeigt, wie die eingesetzten Technologien die individuelle Dosierung von Wirkstoffen für jeden Patienten automatisch und präzise steuern, um Abweichungen zu korrigieren und den Prozess effizienter zu machen.

I.1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt KIKA-IPK verfolgte das Ziel, ein KI-kognitionsunterstützendes Assistenzsystem für die Inprozesskontrolle in der Fertigung zu entwickeln. Im Mittelpunkt stand die Schaffung eines skalierbaren Systems, das Bildmerkmale und Prozesseigenschaften in Echtzeit korrelieren kann, um automatisiert und ressourceneffizient Prozess- und Materialparameter zu optimieren. Besonders adressiert wurden die Herausforderungen im 3D-Metalldruck und beim personalisierten Medikamentendruck, wo bisherige Qualitätskontrollen überwiegend manuell, zeit- und kostenintensiv sowie wenig skalierbar waren. Die Aufgabenstellung beinhaltete die Entwicklung von (1) cloudbasierten KI-Assistenzsystemen für die Inprozesskontrolle, -steuerung und -regelung, (2) selbstlernenden Algorithmen zur Bild- und Prozessauswertung sowie (3) intuitiven Schnittstellen zur Mensch-KI-Interaktion. Ziel war eine Demonstration in realen Anwendungsszenarien und die Validierung in einer produktionsnahen Umgebung.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zu Beginn des Projekts war die Qualitätssicherung in der additiven Fertigung – insbesondere beim Medikamentendruck – dominiert von manuellen, nachgelagerten Kontrollen. KI-Ansätze zur Bildauswertung (z. B. CNNs) waren bereits in der Forschung bekannt, wurden aber in der industriellen Praxis meist nur zur Klassifikation einzelner Bildmerkmale eingesetzt. Die Echtzeitkorrelation von Bilddaten mit Prozessgrößen, adaptive Prozessregelung und die Integration von Nutzerfeedback waren Stand der Forschung und kaum industriell umgesetzt. Insbesondere fehlten skalierbare, praxisnahe Lösungen, die für die Einzel- und Kleinserienfertigung wirtschaftlich tragfähig waren. Ein weiterer Bedarf bestand darin, domänenspezifisches Expertenwissen systematisch in maschinelle Lernprozesse einzubinden. Die Partner des Konsortiums brachten umfangreiche Erfahrungen aus den Bereichen Bildverarbeitung, KI, Automatisierungstechnik und Produktion ein. Der Projektstart erforderte jedoch die Definition gemeinsamer Standards, Schnittstellen und Metriken sowie die Entwicklung einer leistungsfähigen Cloud-Infrastruktur.

Im Projektverlauf wurde die ursprüngliche Idee einer Inprozesskontrolle am Druckkopf verworfen und durch eine bildbasierte Qualitätskontrolle am Endprodukt ersetzt. Dies führte zu einer Verschiebung von Entwicklungsressourcen und erforderte die Entwicklung neuer Bildgebungs- und Auswerteverfahren. Die Integrationstests und finale Softwareintegration wurden zugunsten einer zukunftsfähigen, modularen Architektur auf die nächste Softwaregeneration verschoben.

II. Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Im Teilprojekt „ML-basierte visuelle Prozesskalibrierung und Regelung“ des Verbundprojekts KIKA-IPK wurden mehrere zentrale Ergebnisse erzielt, die die Qualitätssicherung und Prozessregelung im Medikamentendruck grundlegend verbessern:

II.1.1 KI-gestützte Tropfenanalyse

Die Entwicklung und Integration einer KI-basierten Tropfenanalyse ermöglicht erstmals die präzise und automatisierte Kontrolle des Tropfenvolumens und der Tropfenanzahl beim Auftrag von Medikamenten auf orale Folien (ODF). Die KI-Modelle erkennen zuverlässig, ob die Anzahl und das Volumen der aufgetragenen Tropfen den Vorgaben entsprechen. Die Fehlerquote der Erkennung liegt stabil unter 5 %. Das System ist modular aufgebaut und lässt sich in künftige Druckergenerationen übernehmen.

II.1.2 Neues Bildgebungsverfahren für ODF

Ein neu entwickeltes Bildgebungsverfahren auf Basis von Standardfotografie im sichtbaren Licht wurde wirtschaftlich und zuverlässig in den Produktionsprozess integriert. Die KI-gestützte Auswertung kann bis zu sieben übereinanderliegende Tintenschichten erkennen und fehlerhafte Produkte identifizieren. Damit ist eine

umfassende, automatisierte Qualitätskontrolle direkt am Endprodukt möglich, ohne dass aufwendige nasschemische Analysen im Routinebetrieb erforderlich sind.

II.1.3 Integration von Kalibrierungs- und Regelalgorithmen

Für den Druckprozess wurden adaptive, KI-gestützte Kalibrierungs- und Regelalgorithmen entwickelt. Diese überwachen und steuern relevante Prozessparameter (z. B. Druck, Geschwindigkeit, Dosiermenge) in Echtzeit. Ein zentrales Ergebnis ist ein Regressionsmodell, das das Tropfenvolumen auf Basis aktueller Steuerparameter mit einem Fehler von nur 5–6 % vorhersagen kann. Die Regelalgorithmen reagieren adaptiv auf Abweichungen und gewährleisten so eine gleichbleibende Produktqualität.

II.1.4 Cloudbasierte, skalierbare Prozessintegration

Die komplette Bildaufnahme, Analyse und Rückmeldung an die Produktionssteuerung erfolgten über eine moderne, cloudbasierte Kafka-Streaming-Architektur. Dies ermöglichten eine standortübergreifende Skalierbarkeit und die einfache Integration weiterer Produktionslinien. Die gesamte Datenverarbeitungskette wurde erfolgreich aufgebaut, getestet und validiert.

II.1.5 Zusammenarbeit und Transfer

Das Projekt wurde in enger Kooperation mit den Partnern DiHeSys, Relimetrics, PSI und weiteren assoziierten Industriepartnern durchgeführt. Die entwickelten Methoden wurden in Workshops, auf Konferenzen und in der wissenschaftlichen Community vorgestellt und in die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern eingebunden. Erfahrungen und Standards wurden in der Community geteilt und fließen in die nächste Generation von Druckern und Produktionssystemen ein.

II.1.6 Fazit

Das Projekt hat das Ziel, die klassische, aufwendige nasschemische Analyse durch KI-basierte, bildgestützte Verfahren zu ersetzen, erfolgreich erreicht. Die entwickelten Lösungen sind wirtschaftlich, praxistauglich und erhöhen die Prozesssicherheit signifikant. Sie bilden die Basis für eine GMP-konforme, automatisierte Qualitätskontrolle und werden zukünftig in den Produkten der Projektpartner eingesetzt.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

KI-kognitionsunterstützendes Assistenzsystem zur Inprozesskontrolle in der Fertigung (KIKA-IPK) Teilprojekt: ML-basierte visuelle Prozesskalibrierung und Regelung

in der Fördermaßnahme

BMBF: Lernende Produktionstechnik – Einsatz künstlicher Intelligenz
(KI) in der Produktion (ProLern)

Autor

Relimetrics GmbH
Volmerstrasse 9
12489 Berlin

Ender Tasdelen
ender.tasdelen@relimetrics.com

Projektlaufzeit: 01.11.2021 – 28.02.2025
Erstellungsdatum: 26.07.2025
Förderkennzeichen: 02P20A144

Projektpartner

DiHeSys Digital Health Systems GmbH
PSI Software SE
Hamilton Freiburg GmbH (ehemals BiofluidiX)
TU Berlin | Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)
Gestalt Automation GmbH | Gestalt Robotics
GEFERTEC GmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Präambel.....	3
II. Teil II: Eingehende Darstellung.....	4
II.1 Motivation und Aufgabenstellung.....	4
II.1.1 Problemlage und Motivation.....	4
II.1.2 Motivation.....	4
II.1.3 Aufgabenstellung	4
II.1.4 Messbare Teilziele	5
II.1.5 Partnerstruktur	5
II.1.6 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	5
II.1.7 Bisherige Lösungen und deren Grenzen	6
II.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
II.2.1 Geleistete Projektarbeiten und deren Beitrag zur Zielerreichung.....	7
II.2.2 Planabweichungen und Probleme.....	8
II.3 Erzielte Ergebnisse	9
II.3.1 Medikamentendruck.....	9
II.3.2 Entwicklung neuer Druckmuster und Softwaretools.....	9
II.3.3 Integration in das Drucksystem und Durchführung von Experimenten.....	10
II.3.4 Tropfenerkennung und Volumenklassifizierung.....	13
II.3.5 Integration von Kalibrierungs- und Regelalgorithmen für den Druckprozess.....	15
II.4 Integration der cloudbasierten KI in das Produktionssystem	18
II.4.1 Bewertung der Zielerreichung	20
II.4.2 Verwertung und Schutzrechte	20
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	21
II.5.1 Abgrenzung und Neuheit des eigenen Vorhabens	22
II.5.2 Transfer und Austausch mit anderen Initiativen.....	22
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	23
II.6.1 Wirtschaftlicher Nutzen	23
II.6.2 Wissenschaftlich-technischer Nutzen	23
II.6.3 Gesellschaftlicher Nutzen.....	23
II.6.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	24
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	24
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.....	25
II.9 Literaturverzeichnis	26

Präambel

Das Forschungsprojekt KIKA-IPK hat skalierbare KI-Clouddienste mit Assistenzwerkzeugen entwickelt, die selbstständig lernen, wie Bildmerkmale und Prozesseigenschaften zusammenhängen. Dabei wurde das Erfahrungswissen von Maschinenbedienern durch maschinelle Lernverfahren modelliert. Durch Nutzerfeedback und Anomalieerkennung konnten auch bei vergleichsweise wenigen Trainingsdaten KI-Modelle trainiert werden.

Als Ergebnis entstanden in zwei Anwendungsfällen (3D-Metalldruck und Medikamentendruck) Assistenzsysteme, die optische Qualitätsmerkmale und Prozessgrößen während der Herstellung zu analysieren, um ressourceneffizientere Prozessparameter zu ermöglichen. Dies ist besonders geeignet für Kleinserien- und Einzelfertigung.

Insgesamt wurden vier konkrete Ergebnisse erreicht: die Entwicklung von drei KI-basierten Assistenzsystemen sowie einer dazugehörigen individuellen Cloudplattform zur Anbindung der KI-Dienstleister an die Industriepartner. Die Ergebnisse zu den jeweiligen Anwendungsfällen werden im Folgenden einzeln beschrieben:

Anwendungsfall Medikamentendruck

Die im Projekt entwickelten KI-Dienste und Werkzeuge wurden beim personalisierten Medikamentendruck praxisnah getestet. Dabei wurden die Möglichkeiten gezeigt, wie die eingesetzten Technologien die individuelle Dosierung von Wirkstoffen für jeden Patienten automatisch und präzise steuern, um Abweichungen zu korrigieren und den Prozess effizienter zu machen.

II. Teil II: Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

II.1.1 Problemlage und Motivation

Die additive Fertigung – sowohl im Bereich des 3D-Metalldrucks als auch des personalisierten Medikamentendrucks – steht aktuell vor mehreren zentralen Herausforderungen:

Hohe Anforderungen an Produktqualität und Prozesssicherheit: Die Qualitätskontrolle erfolgt bisher meist manuell und nachgelagert. Um die gewünschten Produkteigenschaften zu erreichen, sind langjährige, prozess- und materialspezifische Fachkenntnisse erforderlich.

Ressourcen- und Zeitaufwand: Insbesondere bei kleinen Losgrößen wird die Prozess- und Materialkonfiguration in zahlreichen Kalibrierungsschritten durch Fachexperten manuell ermittelt. Die Qualitätskontrolle findet meist offline durch visuelle Inspektion oder zerstörende Prüfungen statt. Fehler oder Ausschuss werden so erst nach dem kostenintensiven Produktionsprozess erkannt.

Fehlende Automatisierung: Es existieren bisher keine bedienerfreundlichen, vollautomatischen Lösungen, die auch weniger erfahrenen Anwendern eine sichere Fertigung ermöglichen. Die Bedienung der Anlagen ist komplex und setzt Expertenwissen voraus.

Unzureichende Inprozesskontrolle: Klassische Kontrollmethoden (z. B. nasschemische Analysen im Medikamentendruck) sind zeit- und kostenintensiv und für die Einzel- oder Kleinserienfertigung wenig geeignet.

II.1.2 Motivation

Das Projekt KIKA-IPK ist angetreten, diese Lücken durch den Einsatz von KI-basierten, kognitionsunterstützenden Assistenzsystemen zu schließen. Ziel ist es, durch die Modellierung des Erfahrungswissens von Maschinenbedienern mittels maschineller Lernverfahren eine automatisierte, ressourceneffiziente Prozess- und Materialkonfiguration zu ermöglichen. Damit sollen die Produktqualität gesteigert, der Ressourceneinsatz gesenkt und die Wettbewerbsfähigkeit der Partner nachhaltig erhöht werden.

II.1.3 Aufgabenstellung

Aus der Problemlage ergibt sich die folgende Aufgabenstellung:

1. Entwicklung eines skalierbaren, KI-kognitionsunterstützenden Assistenzsystems zur Inprozesskontrolle, das durch selbstlernende Bildmerkmalskorrelationen mit Prozesseigenschaften eine ressourceneffiziente Prozess- und Materialkonfiguration ermöglicht.
2. Automatisierung der Inprozesskontrolle (IPK), -steuerung (IPS) und -regelung (IPR) während der Fertigung durch die Verbindung von Bilddaten und Prozessgrößen in KI-Modellen.

Demonstration und Validierung des Systems in zwei Anwendungsszenarien:

1. Additives Auftragsschweißen von Metallen (3D-Metalldruck)
2. Drop-on-Demand-Verfahren für den personalisierten Medikamentendruck

II.1.4 Messbare Teilziele

1. Mensch-KI-hybride Automatisierung mit intuitiven Schnittstellen zu KI-Cloud-Diensten
2. Entwicklung von KIC-Diensten für die visuelle Bauteil- und Materialcharakterisierung sowie die Prozesskalibrierung
3. Erprobung und Überführung der Lösungen in eine produktnahe Umgebung

II.1.5 Partnerstruktur

Das Projekt wurde von einem interdisziplinären Konsortium durchgeführt, das die gesamte Wertschöpfungskette abdeckt:

Partner	Rolle / Beitrag
Relimetrics GmbH	Koordination, Entwicklung von KI-Assistenzsystemen und Bildverarbeitung
DiHeSys Digital Health Systems GmbH	Entwicklung und Validierung KI-basierter Qualitätssicherung im Medikamentendruck
PSI Software SE	Cloud-Infrastruktur, Schnittstellen, Datenmanagement
Hamilton Freiburg GmbH	Entwicklung des Dosiersystems und Prozesssteuerung
TU Berlin (IWF)	Wissenschaftliche Begleitung, Methodenentwicklung
Gestalt Automation GmbH	Automatisierung, Integration in industrielle Fertigungsumgebungen
GEFERTEC GmbH	3D-Metalldruck, industrielle Testumgebungen

Vorarbeiten und Vorkenntnisse: Alle Partner verfügten über umfassende Erfahrungen in ihren jeweiligen Domänen. Relimetrics und TU Berlin haben bereits ML-Methoden zur Qualitätskontrolle im 3D-Druck und der Bildanalyse entwickelt. DiHeSys und Hamilton besitzen Expertise in Dosierprozessen und pharmazeutischer Produktion. PSI und Gestalt Automation sind erfahren in Cloud-Integration und industrieller Automatisierung.

Technische Infrastruktur: Es stehen eigene Hardware (z. B. Drucker, Kamerasysteme), spezialisierte Softwarelösungen und sichere Cloud-Infrastrukturen zur Verfügung.

II.1.6 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zu Beginn des Projekts KIKA-IPK zeigte sich, dass die Qualitätssicherung und Prozessregelung in der additiven Fertigung – sowohl beim 3D-Metalldruck als auch beim personalisierten Medikamentendruck – in der Praxis weitgehend manuell und nachgelagert erfolgt. Die Prozess- und Materialkonfigurationen werden häufig durch erfahrenes Fachpersonal in aufwendigen Kalibrierungsschritten eingestellt, während die Qualitätskontrolle meist offline nach dem Fertigen durchgeführt wird. Dies führt zu hohem Ressourceneinsatz, Ausschuss und begrenzter Skalierbarkeit, insbesondere bei kleinen Losgrößen.

Die Motivation für das Vorhaben war es, diese Lücke durch den Einsatz von KI-basierten Assistenzsystemen zu schließen. Ziel war die Entwicklung eines Systems, das Bildmerkmale

mit Prozesseigenschaften korreliert, um eine echtzeitfähige, ressourceneffiziente Prozesskontrolle und -regelung zu ermöglichen.

II.1.7 Bisherige Lösungen und deren Grenzen

- In der Produktionstechnik wurden bereits KI-basierte Assistenzsysteme entwickelt, die beispielsweise Oberflächenfehler erkennen (z. B. durch Convolutional Neural Networks, CNN). Solche Systeme erreichen hohe Erkennungsraten für Qualitätsabweichungen, beschränken sich jedoch meist auf die reine Klassifikation von Bildmerkmalen.
- Die Korrelation von Bildmerkmalen mit konkreten Prozessparametern und die automatische Anpassung von Prozessgrößen war zum Projektbeginn Stand der Forschung, jedoch in der industriellen Praxis kaum umgesetzt. Klassische Methoden nichtlinearer Dynamik, z. B. für das Laserauftragsschweißen, mussten aufwändig prozessspezifisch modelliert werden und waren nur eingeschränkt übertragbar.
- Ansätze wie „Active Learning“ und „Few-Shot Learning“ ermöglichten bereits das dateneffiziente Anlernen von ML-Methoden, jedoch fehlte es an robusten Lösungen zur Echtzeitanpassung der Prozessführung in komplexen Fertigungsverfahren.

Innovationsbedarf

- Für den adressierten Anwendungsfall Medikamentendruck existierten keine bekannten Lösungen, die selbstlernend Bilddaten und Prozessdaten in Echtzeit korrelieren, daraus adaptive Steuerungs- und Regelstrategien ableiten und dabei kontinuierlich durch Nutzerfeedback verbessert werden.
- Besonders für den Medikamentendruck bestand die Herausforderung, kleinste Tropfenmengen exakt zu dosieren und zu dokumentieren. Klassische Kontrollmethoden wie die nasschemische Analyse sind zeitaufwändig, teuer und für die Kleinserienproduktion unpraktisch.
- Die Integration von domänenspezifischem Wissen (z. B. von Laborpersonal) in maschinelle Lernverfahren war Stand der Technik noch nicht gelöst.

Im Bereich Medikamentendruck existierten erste Ansätze zur automatisierten Volumenkontrolle einzelner Tropfen, jedoch fehlte ein skalierbares, KI-gestütztes System zur vollständigen Prozessüberwachung und Qualitätssicherung in Echtzeit.

Die Verbundpartner brachten umfassendes Know-how in den Bereichen Bildverarbeitung, KI-Methoden, Prozessautomation und pharmazeutische Produktion ein. Es war jedoch erforderlich, gemeinsame technische Standards, Datenschnittstellen und Metriken zu definieren, um eine nahtlose Integration der Systeme und eine domänenübergreifende Entwicklung zu ermöglichen.

Neuheit des Lösungsansatzes

Das Projekt KIKA-IPK setzte erstmals auf die Kombination von Active-Learning-Ansätzen mit Few-/Zero-Shot-Learning, um eine selbstlernende Korrelation von Bild- und Prozessmerkmalen für die adaptive Prozesssteuerung und -regelung zu realisieren. Die wesentlichen Innovationen waren:

- Echtzeitfähige, cloudbasierte Assistenzsysteme, die Bilddaten und Prozessdaten kontinuierlich auswerten.

- Adaptive Steuerungs- und Regelalgorithmen, die sich durch Nutzerfeedback und neue Prozessdaten selbst verbessern.
- Durchgängige Prozessüberwachung von der Tropfenerzeugung bis zur Qualitätskontrolle des Endprodukts im Medikamentendruck.
- Entwicklung von Schnittstellen (z. B. mittels Apache Kafka), die eine skalierbare Anbindung vieler Produktionssysteme an die KI-Infrastruktur erlauben.

II.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das KIKA-IPK-Projekt wurde anhand einer klaren Arbeitspaket- (AP) und Meilenstein-Struktur umgesetzt, wie in der Gesamtvorhabenbeschreibung (V.04, 01.06.2022) festgelegt. Die Projektlaufzeit erstreckt sich vom 01.11.2021 bis 28.02.2025. Die Ziele und erwarteten Resultate blieben trotz einer kostenneutralen Anpassung des Zeitplans unverändert.

Das Vorhaben gliederte sich in drei Hauptbereiche:

1. Entwicklung der KIKA-Cloud-Plattform für KI-gestützte Inprozesskontrolle, -steuerung und -regelung
2. Demonstrator 2: Kalibrierung und Inprozessregelung beim Medikamentendruck

II.2.1 Geleistete Projektarbeiten und deren Beitrag zur Zielerreichung

KIKA-Cloud-Plattform (AP1–AP3)

- Aufbau einer skalierbaren, cloudbasierten Architektur für die Integration von Bild- und Prozessdatenströmen.
- Entwicklung von KIC-Schnittstellen für Maschinen, Akteure und Entwickler zur Integration von Nutzerfeedback, Bildannotation und Backend-Services.
- Implementierung von Active-Learning-Ansätzen zur kontinuierlichen Modellverbesserung.
- Entwicklung von Assistenzwerkzeugen für Visualisierung, Schwellwertermittlung und Nutzerinteraktion.

Demonstrator 2: Medikamentendruck (AP5–AP7)

- Entwicklung einer KI-gestützten Tropfenerkennung und Volumenklassifizierung auf Basis eines bildgebenden Systems.
- Entwicklung und Integration von Kalibrierungs- und Regelalgorithmen für den Druckprozess.
- Aufbau eines modularen Hardware- und Software-Frameworks (Kamera, Beleuchtung, Bildverarbeitung, Datenübertragung).
- Durchführung von Experimenten zu Kaskaden- und Mehrlagendruck, Generierung eines umfangreichen Bilddatensatzes für das KI-Training.
- Implementierung einer cloudbasierten KI-Auswertung über Apache Kafka, inklusive Entwicklung standardisierter Datenformate.
- Erfolgreiche Validierung der Erkennungssicherheit (z. B. sieben Tintenschichten zuverlässig detektierbar).

Projektmanagement und Transfer (AP8)

- Nutzung von Tools wie Jira und SVN für Projektsteuerung und Softwareversionierung.

- Regelmäßige Projekttreffen und Erfahrungsaustausch, aktive Öffentlichkeitsarbeit und Dissemination auf Konferenzen und Messen.
- Planung und Durchführung von externen Workshops mit assoziierten Partnern.

II.2.2 Planabweichungen und Probleme

ODF-Analyse: Die ursprünglich geplante Inprozesskontrolle am Druckkopf erwies sich als ungeeignet. Daher wurde ein neues, bildbasiertes Analyseverfahren für das Endprodukt entwickelt, was eine Verschiebung von Entwicklungsressourcen erforderte.

Integrationstests: Die vollständige Integration der ODF-Analyse in die aktuelle Softwaregeneration wurde zugunsten einer künftigen, modularen Systemarchitektur zurückgestellt.

Materialzugang: Die geplanten Tests mit Wirkstofftinten und neuen ODFs konnten aus Entwicklungs- und Kostengründen nicht wie vorgesehen umgesetzt werden. Die Validierung erfolgte mit Placebo-Tinten und Referenzmaterialien.

Technische Limitationen: Die Erhöhung der Druckfrequenz erforderte eine Anpassung der Steuerung und verschob den Fokus von einer cloudbasierten auf eine lokal integrierte KI-Lösung.

Bewertung der Angemessenheit

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die ambitionierten Ziele des Vorhabens zu erreichen. Die iterative Entwicklung, die flexible Reaktion auf technische Herausforderungen und die enge Abstimmung im Konsortium trugen maßgeblich zur Zielerreichung bei. Die Verwendung der Zuwendung war sachgerecht, zielorientiert und wurde laufend evaluiert. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine nachhaltige Verwertung und Weiterentwicklung der Projektinhalte.

II.3 Erzielte Ergebnisse

II.3.1 Medikamentendruck

Die Detektion und Bestimmung der auf ein ODF gedruckten Tropfen wird maßgeblich durch mehrere Einflussgrößen bestimmt. Zu den wichtigsten Faktoren zählen das Druckmuster, das auf dem ODF erzeugt wird, sowie die Textur des verwendeten ODF-Papiers. Beide Aspekte beeinflussen die Verteilung und Sichtbarkeit der einzelnen Tropfen und damit die Genauigkeit der bildgestützten Erkennung. Darüber hinaus spielt das Mischungsverhältnis von Farbstoff und Medikament eine zentrale Rolle, da es sowohl die optische Erkennbarkeit als auch die pharmazeutische Relevanz der Tropfenbestimmung bestimmt.

Einen weiteren erheblichen Einfluss haben die verwendeten Hardwarekomponenten, insbesondere die Auswahl von Kamera und Objektiv, sowie die Art und Qualität der Beleuchtung. Hochwertige Kamerasysteme mit geeigneter Optik und optimierter Beleuchtung sind entscheidend, um ausreichend kontrastreiche und scharfe Bilder für die Auswertung zu generieren. Dabei muss die Beleuchtung so gewählt werden, dass Reflexionen minimiert und die Tropfen unabhängig von deren Position und Volumen zuverlässig detektiert werden können.

Nicht zuletzt ist auch die Farbe der eingesetzten Tinte ein wesentlicher Einflussfaktor. Farbige Tinten erhöhen die Detektionssicherheit erheblich, da die Tropfen auf dem ODF visuell besser vom Hintergrund abgrenzbar sind. Gerade bei farblosen oder schwach eingefärbten Lösungen können ansonsten fehlerhafte oder unvollständige Erkennungen auftreten. Die Kombination all dieser Einflussgrößen bestimmt die Präzision und Verlässlichkeit der Tropfenerkennung im Qualitätssicherungsprozess.

II.3.2 Entwicklung neuer Druckmuster und Softwaretools

Da die bisherigen Druckmuster nicht für eingefärbte Tinten geeignet waren, wurde von DiHeSys eine neue Software zur Generierung variabler Druckmuster entwickelt. Diese ermöglichte:

- gezielte Variation der **Tropfenmengen** für Kaskadenexperimente,
- Anpassung von **Tropfenabständen** und **Musterformen** für optimale Erkennung,
- Simulation von **Mehrlagendruck**, also dem Übereinanderdrucken mehrerer Tropfen, zum Test der Mehrschichterkennung

Dieser Mustergenerator wurde so erzeugt, dass er auf Druckern von DiHeSys bedruckte ODFs produzieren konnte.

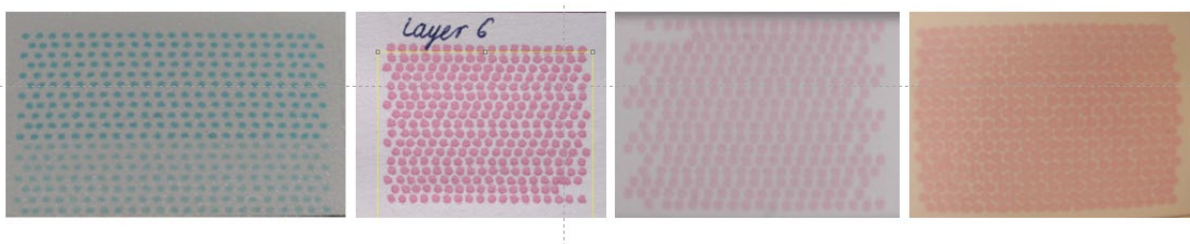


Abbildung 1: Entwicklung neuer Druckmuster

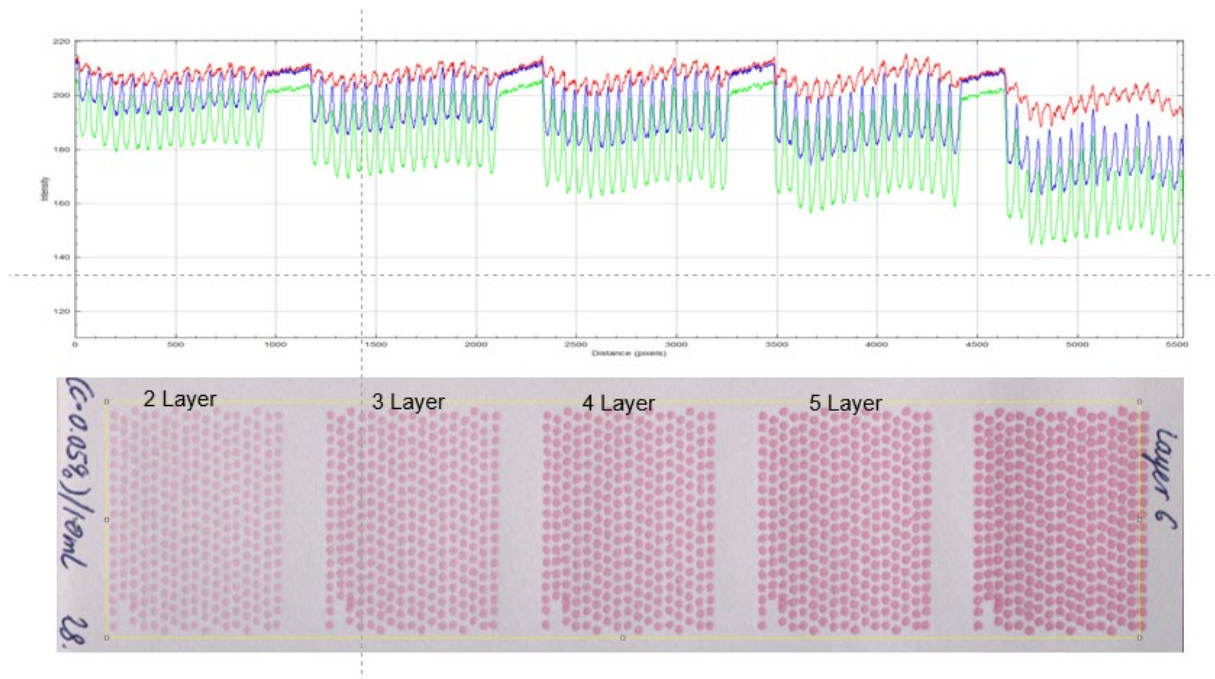


Abbildung 2: Mehrlagendruck (bis zu 7 Layer übereinander)

Diese Druckmuster dienten als Grundlage für realitätsgetreue Experimente und lieferten wertvolle Daten zur Kalibrierung der KI durch Relimetrics sowie zur Validierung ihrer Detektionsgenauigkeit.

II.3.3 Integration in das Drucksystem und Durchführung von Experimenten

Das bestehende Drucksystem wurde technisch erweitert, um Kamera, Beleuchtung und Bildverarbeitung vollständig zu integrieren. In dieser Phase wurden strukturierte Experimente durchgeführt, darunter:

- **Kaskadenexperimente:** Ziel war es, die optimale Tropfenverteilung für eine zuverlässige Erkennung zu ermitteln.
- **Mehrlagendruck:** Es wurden ODFs mit bis zu sieben Tintenschichten gedruckt, um zu prüfen, ob die KI die Anzahl der Schichten anhand der Farbintensität korrekt bestimmen kann.
- **Bilddatenerfassung:** Insgesamt wurden über 1.000 valide Referenzbilder sowie mehr als 100 gezielt erzeugte Fehlerbilder erstellt, um die KI auch auf fehlerhafte Druckmuster zu trainieren.

In enger Zusammenarbeit mit DiHeSys wurde die optimale Bildgebung erarbeitet, sodass die aufgenommenen Bilder zuverlässig durch die KI analysiert werden konnten.

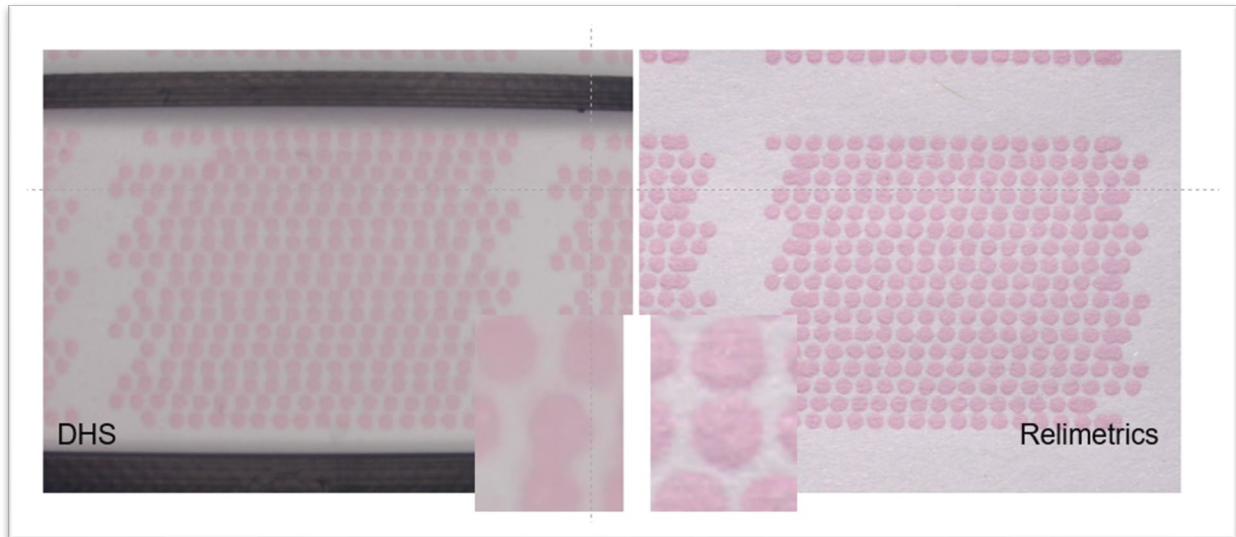


Abbildung 3: Einfluss der Kamera und Objektiv

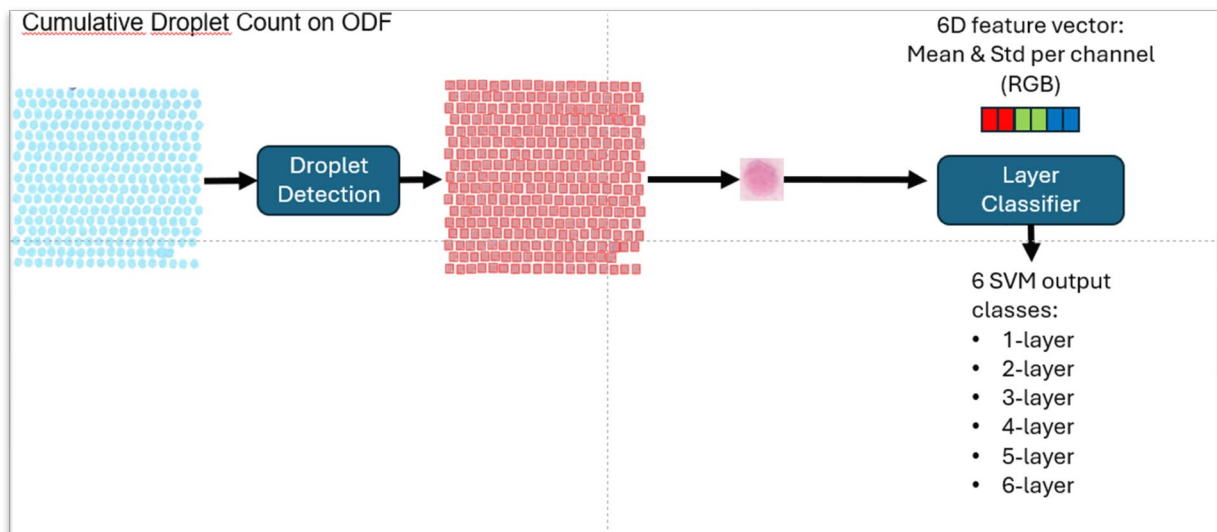


Abbildung 4: ML Prozessmodell zur ODF Tröpfchenbestimmung

Auswertung und Ergebnisse

Relimetrics führte die Auswertung der Bilddaten durch und testete verschiedene KI-Modelle zur Tropfenerkennung. Die finale KI-Technologie wurde mit dem vollständigen Bilddatensatz trainiert und validiert.

Die Ergebnisse waren äußerst positiv:

- Die KI war in der Lage, anhand der Farbintensität bis zu sieben übereinander gedruckte Tropfenschichten zuverlässig zu erkennen – innerhalb der zulässigen Toleranzen.

Damit wurde erstmals ermöglicht, durch eine einzige Aufnahme des Endprodukts Rückschlüsse auf die gesamte Druckqualität zu ziehen. Eine schichtweise Analyse war nicht mehr erforderlich, was zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führte.

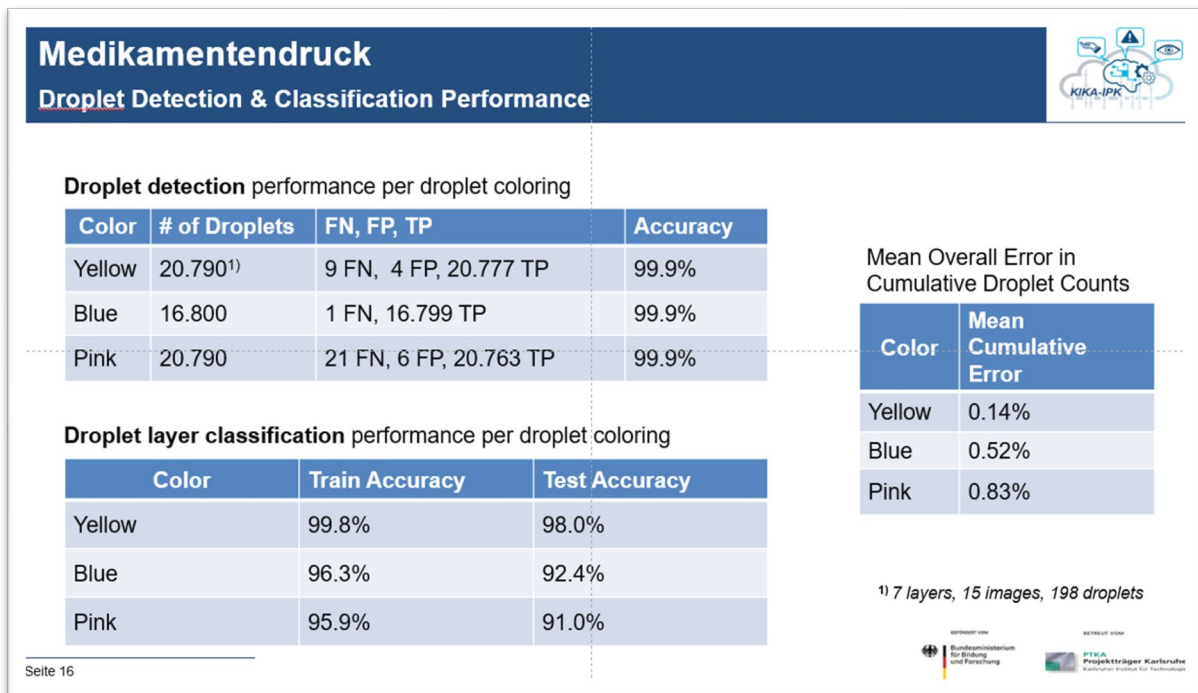


Abbildung 6: Performanz-Bewertung des ML Modells zur ODF Klassifikation

II.3.4 Tropfenerkennung und Volumenklassifizierung

Hintergrund und Zielsetzung

Die wiederholbare Erzeugung und präzise Detektion von Tropfen mit definiertem Volumen auf ODFs (orodispersible films) stellt eine zentrale Herausforderung für die Qualitätssicherung in der personalisierten Arzneimittelherstellung dar. Im Rahmen des Projekts lag der Fokus darauf, eine robuste, KI-gestützte Lösung zu entwickeln, die sowohl die Anzahl als auch das Volumen der aufgetragenen Tropfen automatisiert und zuverlässig bestimmt. Damit sollte die Effizienz der Qualitätskontrolle signifikant gesteigert und die Prozesszeit bei gleichbleibender Bildgröße deutlich reduziert werden.

Entwicklung und Umsetzung

Aus technischer Sicht wurde ein mehrstufiges Machine-Learning-Modell entwickelt und implementiert, das die Detektion, Volumenbestimmung und Qualitätsbewertung von Tropfen auf ODFs (orodispersible films) automatisiert durchführt. Das System verarbeitet Bilddaten aus einer speziell konzipierten Kamerainfrastruktur, die nach Bildvorverarbeitung (u. a. Hintergrundkorrektur, Schwellenwertsetzung, Konturdetektion) an ein neuronales Netz übertragen werden. Der Regressor liefert in Echtzeit Schätzwerte für Tropfenvolumen und Form (Circularity) und erkennt Satellitentropfen.

Ein ML-Modell zur Tropfencharakterisierung wurde entwickelt und implementiert (Abbildung nachfolgend).

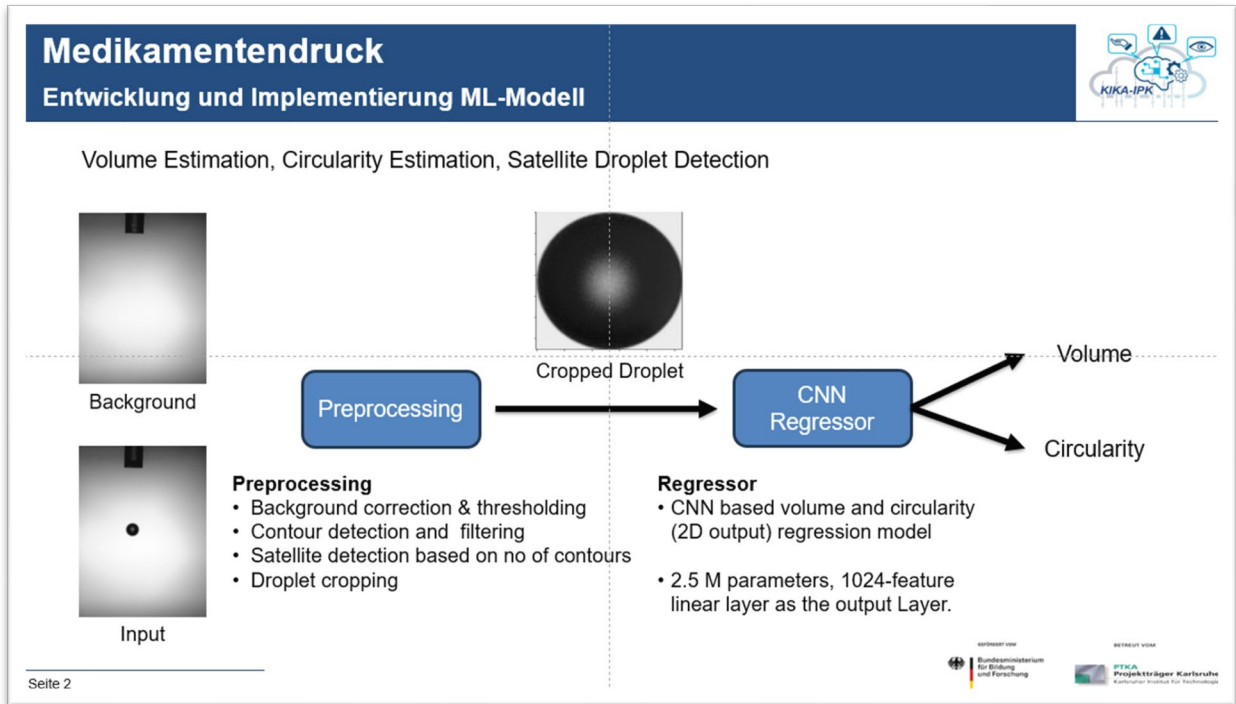


Abbildung 7: Modell zur Tropfencharakterisierung

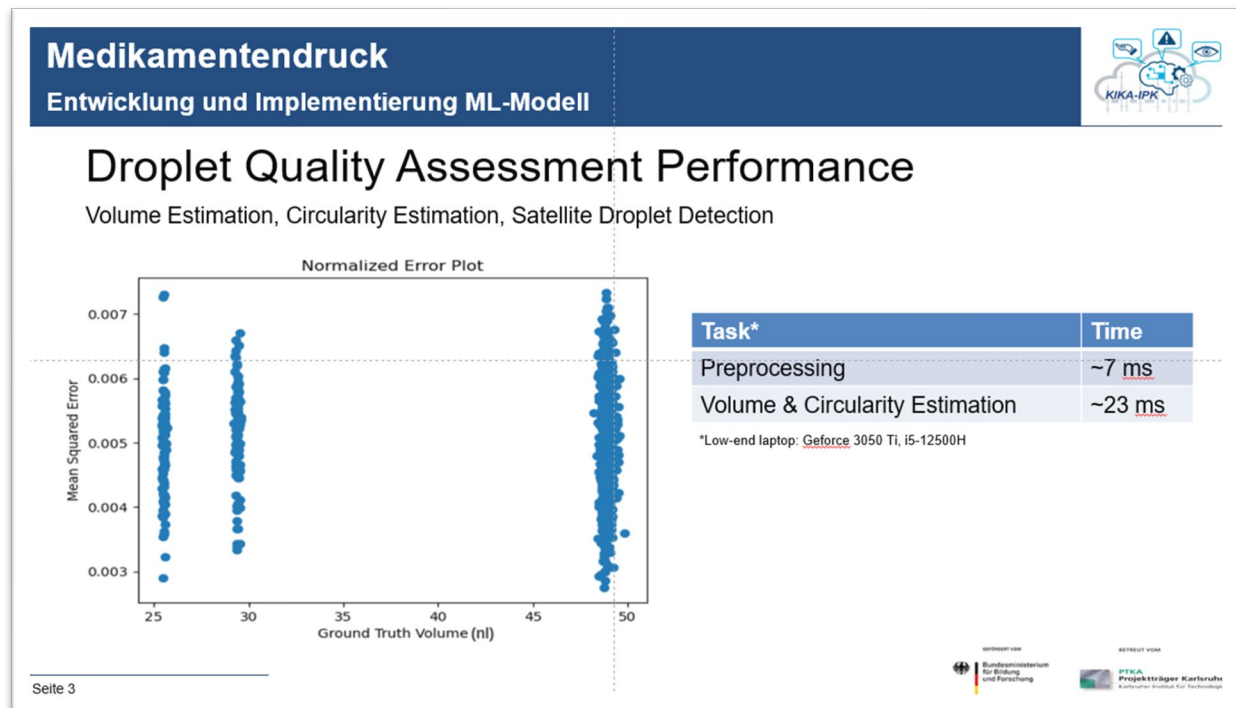


Abbildung 8: Qualitätsbewertung des ML Modells

Die entwickelte KI-Lösung erfüllt die wissenschaftlich-technischen Zielstellungen des Projekts vollumfänglich. Die Detektionsgenauigkeit, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Volumenklassifizierung entsprechen den Anforderungen der industriellen Qualitätssicherung im Medikamentendruck. Die Implementierung auf Basis von Open-Source Frameworks (PyTorch) gewährleistet eine zukunftssichere und flexibel erweiterbare Systemarchitektur.

II.3.5 Integration von Kalibrierungs- und Regelalgorithmen für den Druckprozess

Im Rahmen des KIKA-IPK-Projekts wurden umfangreiche Arbeiten zur Inprozessregelung realisiert, die einen entscheidenden Beitrag zur Automatisierung und Qualitätssicherung im personalisierten Medikamentendruck leisten. Kern der Arbeiten war die Entwicklung eines KI-gestützten Assistenzsystems, das durch selbstlernende Korrelation von Bildmerkmalen und Prozesseigenschaften eine adaptive Prozessregelung im laufenden Produktionsprozess ermöglicht.

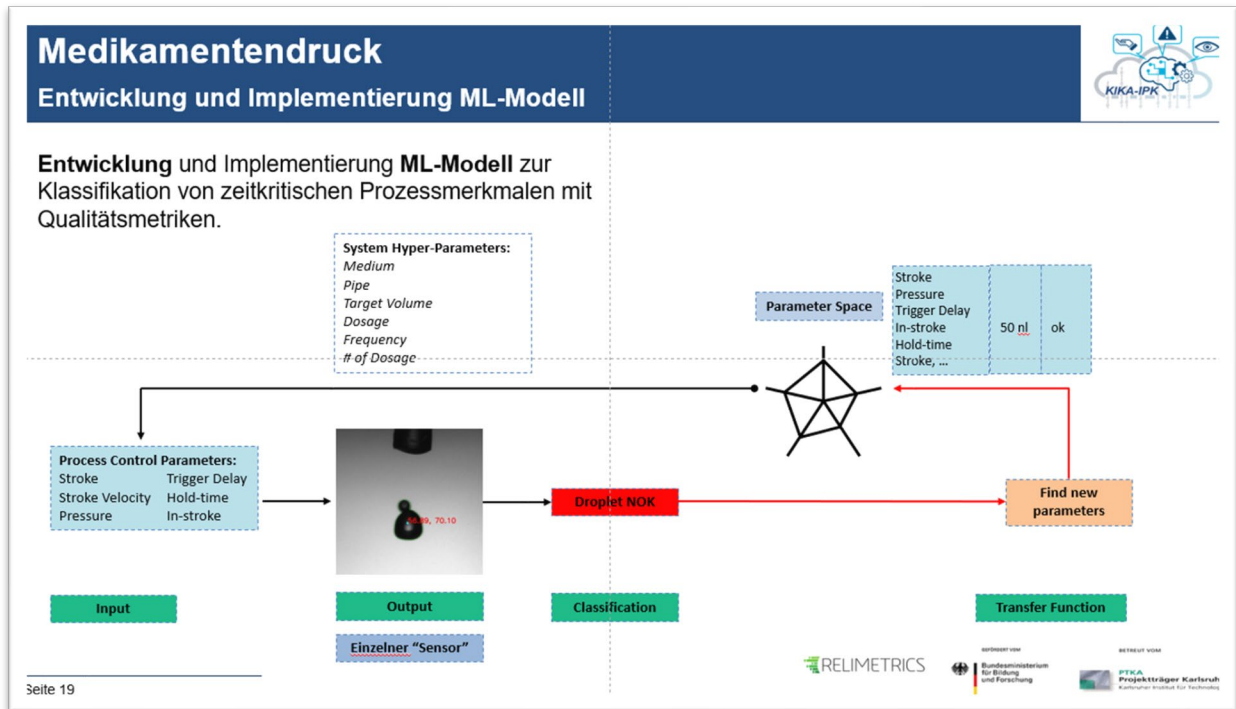


Abbildung 9: Prozessmodell zur Klassifikation zeitkritischer Prozessmerkmale

Für die Inprozessregelung wurden nicht nur alle relevanten Prozessparameter wie Stroke, Trigger Delay, Stroke Velocity, Hold-time und Pressure automatisiert überwacht, sondern auch System-Hyperparameter wie Medium, Pipe, Target Volume, Dosage Frequency und Anzahl Dosagen einbezogen. Ein zentrales Ergebnis ist das entwickelte Regressionsmodell, das das Druckvolumen eines Tropfens auf Basis der aktuellen Steuerparameter zuverlässig vorhersagt. Die Validierung zeigte einen relativen Fehler von nur 5–6 % im Vergleich zum Ground Truth, was die Praxistauglichkeit des Ansatzes belegt.

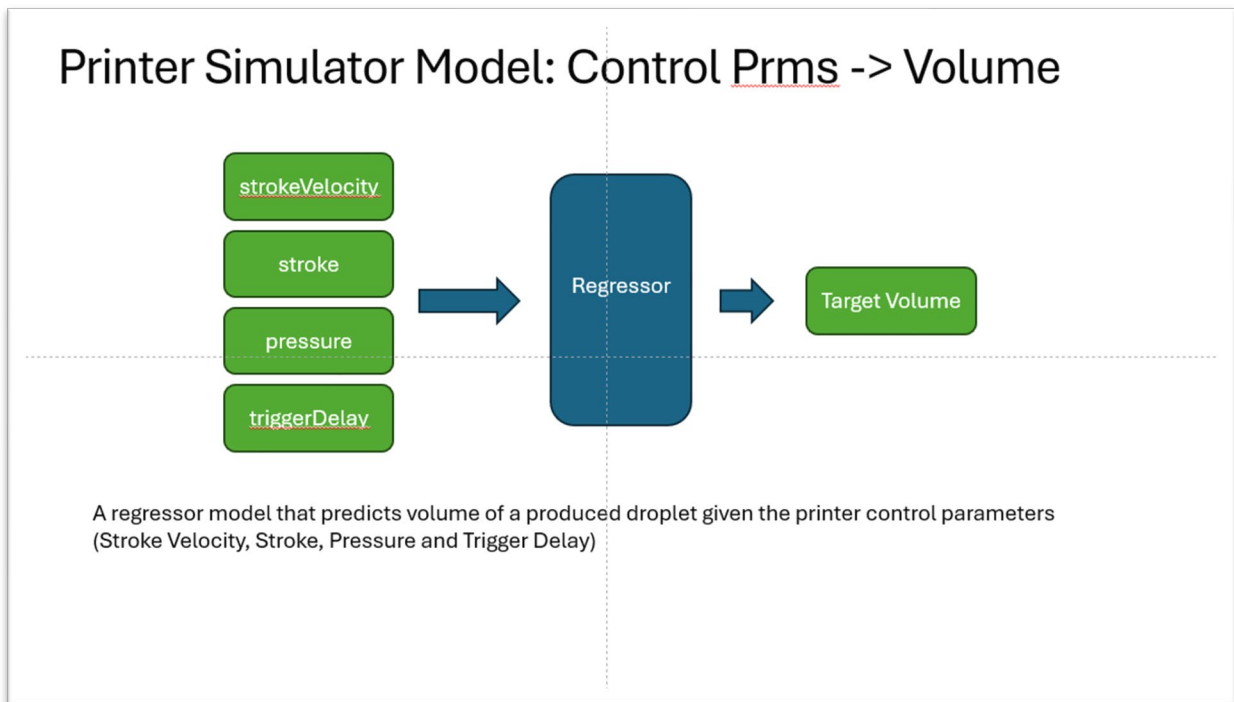


Abbildung 10: Ableitung der Prozessmerkmale zum Zielvolumen

Besonderes Augenmerk wurde auf die Integration von Nutzerfeedback gelegt: Über die Mensch-KI-Schnittstelle konnten Bediener Schwellwerte und Qualitätsmetriken festlegen, die wiederum zum kontinuierlichen Training der KI-Modelle genutzt wurden (Active Learning). Die adaptive Regelung wurde durch die laufende Rückkopplung der Bilddaten mit den aktuellen Prozessparametern unterstützt. So konnten Abweichungen von den Qualitätszielen frühzeitig erkannt und die Druckparameter automatisch angepasst werden, etwa durch Justierung des Drucks, der Geschwindigkeit oder der Dosiermenge.

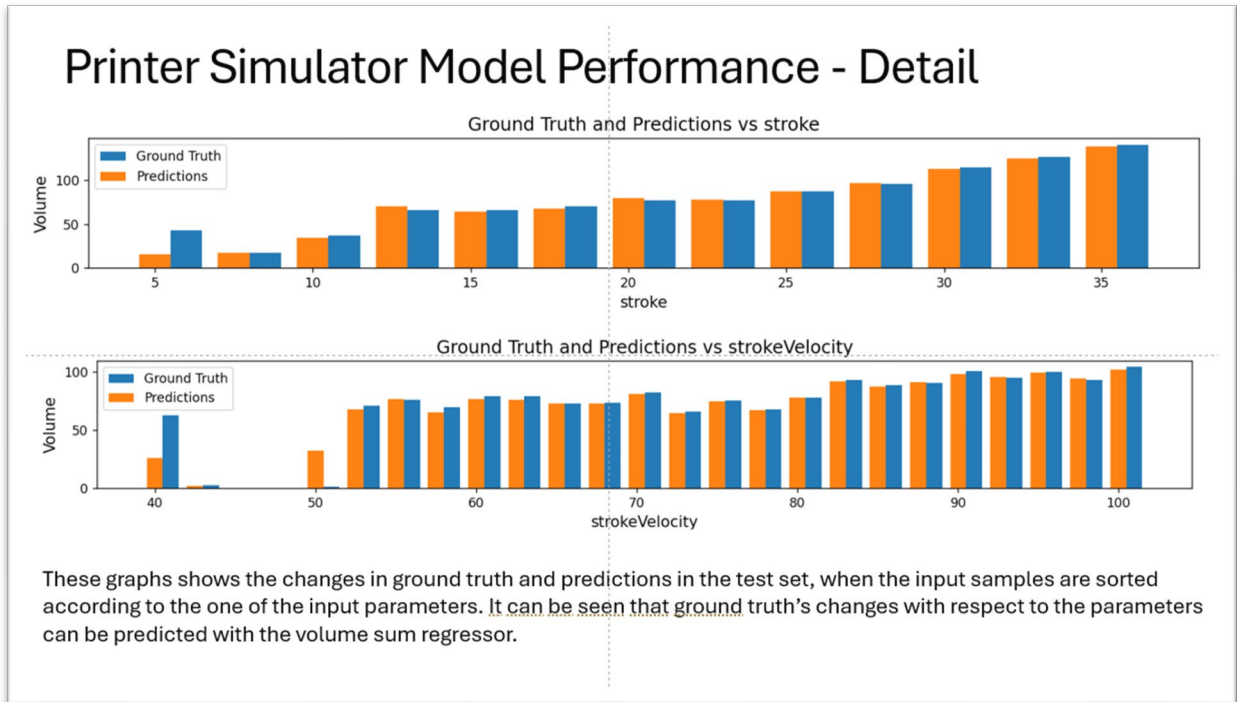


Abbildung 11: Vergleich der Prozessmerkmale "stroke" und "stroke velocity"

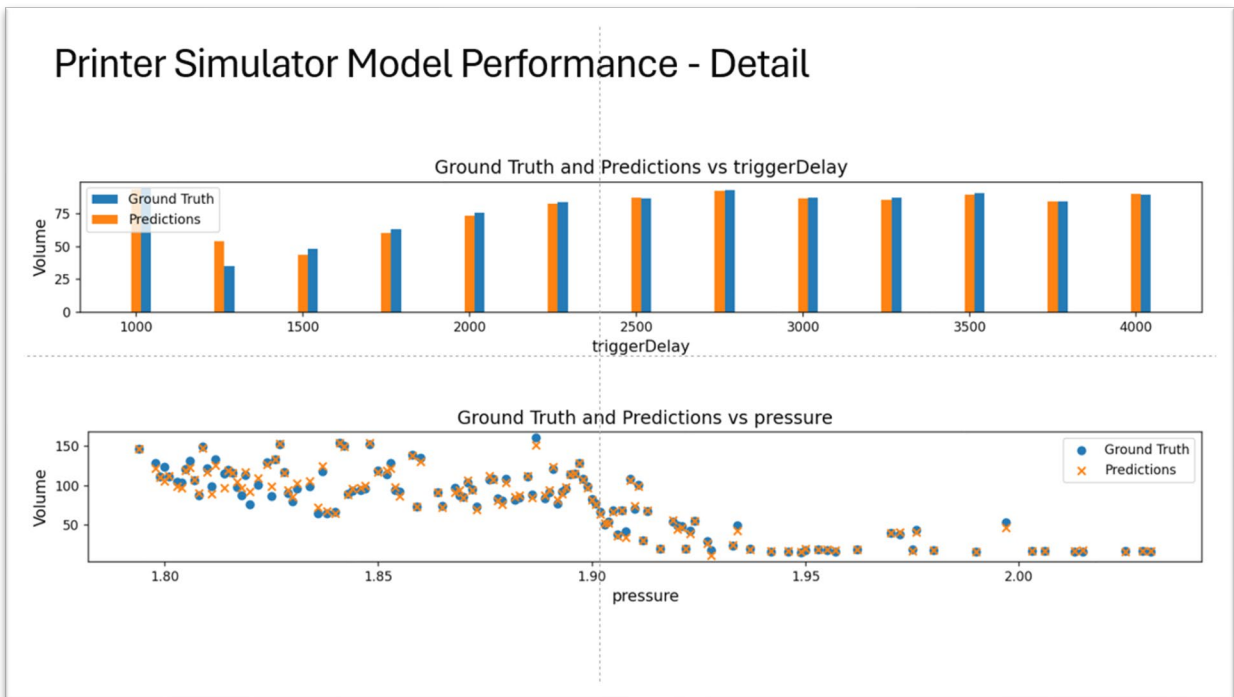


Abbildung 12: Abbildung 11: Vergleich der Prozessmerkmale "trigger delay" und "pressure"

Printer Simulator Model Performance

Performance Metric	Training Set	Testing Set
Mean Absolute Volume Error (MAE)	4.92 (nl)	5.35 (nl)
Mean Ground Truth Value	85.72 (nl)	85.16 (nl)
Relative MAE (%)	5.8%	6.6%

The simulator model demonstrates 5-6 % relative volume estimation error given the printer control parameters

Abbildung 13: Qualitätsbewertung der ML Modells zur Inprozess-Regelung

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Arbeiten, dass eine KI-gestützte Inprozessregelung im Medikamentendruck nicht nur technisch realisierbar, sondern auch wirtschaftlich vorteilhaft ist. Sie reduziert den manuellen Kalibrierungsaufwand, erhöht die Prozesssicherheit und ermöglicht eine GMP-konforme lückenlose Dokumentation. Das entwickelte System ist modular, zukunftssicher und stellt einen wichtigen Schritt zur Digitalisierung und Automatisierung pharmazeutischer Produktionsprozesse dar.

II.4 Integration der cloudbasierten KI in das Produktionssystem

Für den praktischen Einsatz der entwickelten KI-Methoden war es erforderlich, die cloudbasierte KI-Lösung nahtlos in das bestehende Produktionssystem zu integrieren. Ziel war es, eine automatisierte, skalierbare und zuverlässige Qualitätskontrolle im laufenden Produktionsprozess zu ermöglichen.

Die gewählte Architektur basiert auf einem Streaming-Ansatz unter Verwendung von Apache Kafka als zentrales Kommunikationsprotokoll. In diesem System fungiert DiHeSys als Kafka-Producer: Bilder, die während des Produktionsprozesses aufgenommen werden, werden in Echtzeit an den Kafka-Server gesendet. Dort übernimmt die KI-Plattform des Partners Relimetrics als Kafka-Consumer die eingehenden Bilddaten, analysiert sie mithilfe trainierter Modelle und sendet die bewerteten Ergebnisse über denselben Kanal zurück an DiHeSys. Die erhaltenen Bewertungen werden anschließend dem jeweiligen Produkt zugeordnet und dem Benutzer im Produktionssystem zur Verfügung gestellt.

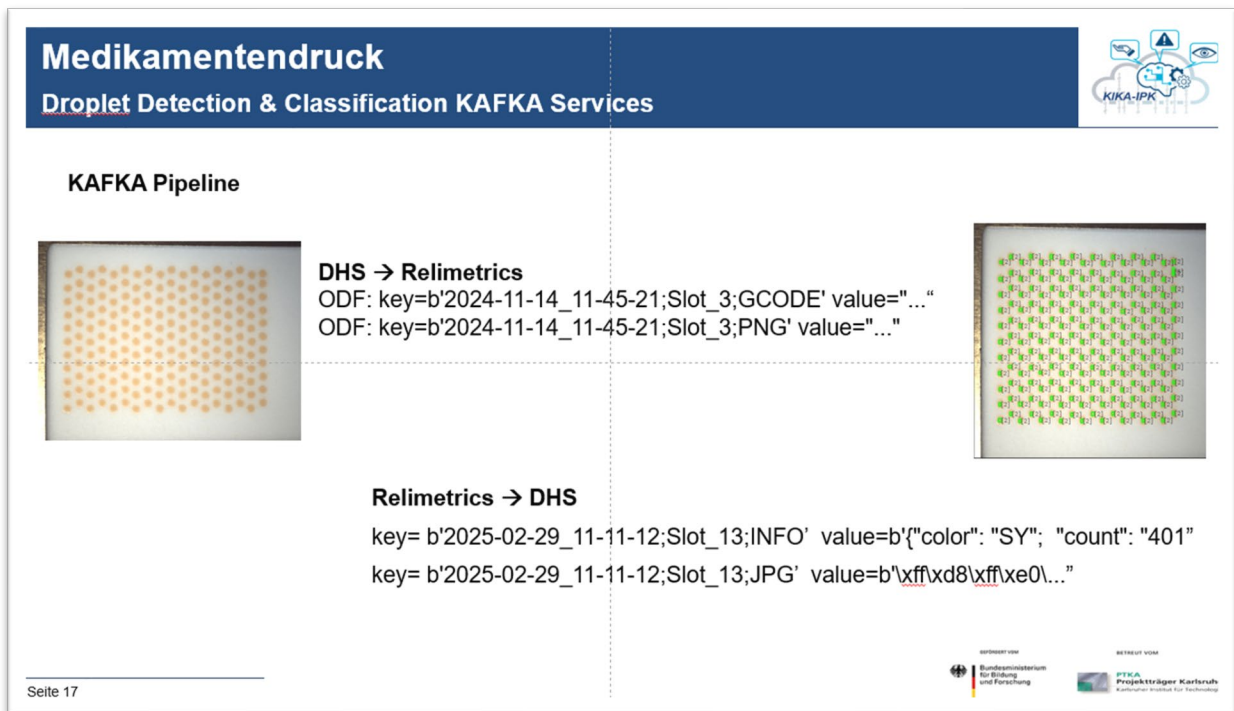


Abbildung 14: Kafka-Pipeline zwischen DiHeSys und Relimetrics

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner Skalierbarkeit: Die Infrastruktur wurde so konzipiert, dass künftig beliebig viele Drucker gleichzeitig Bilddaten einspeisen und Ergebnisse empfangen können – ohne dass individuelle Konfigurationen pro Gerät erforderlich sind. Diese Flexibilität ist ein entscheidender Schritt in Richtung einer industriellen Serienproduktion.

Die technische Konzeption und Bereitstellung der zugrunde liegenden Infrastruktur erfolgte durch den Projektpartner PSI. Für den konkreten Anwendungsfall des Medikamentendrucks waren dabei insbesondere folgende Entwicklungsschritte von Bedeutung:

- **Anpassung der Bewertungsmetriken** auf Basis experimenteller Erkenntnisse, um eine zuverlässige Qualitätsaussage zu ermöglichen.
- **Definition eines standardisierten Datenformats** für den reibungslosen Austausch zwischen Produktionssystem, KI-Komponente und Analysesoftware.
- **Entwicklung eines Kafka-Producers**, der Bilddaten aus dem Produktionsprozess erfasst und in das Netzwerk einspeist.
- **Implementierung eines Kafka-Consumers**, der die analysierten Bilddaten von Relimetrics empfängt. Die eindeutige Zuordnung jedes Bildes wird durch eine strukturierte Dateibenennung gewährleistet, was eine vollständige Rückverfolgbarkeit sicherstellt.

Ein besonderer technischer Fokus lag auf der Optimierung der Bilddatenübertragung. Durch die Festlegung einer einheitlichen Bildgröße konnte sichergestellt werden, dass jedes Bild in einem einzigen, klar interpretierbaren Datenpaket übertragen wird. Dies verhinderte eine fragmentierte Übertragung und erleichterte die Verarbeitung auf allen Systemebenen.

Systemtest und Validierung

Das Gesamtsystem – bestehend aus Kamera, Bilderfassung, KI-Analyse, Datenübertragung und Rückmeldung an das Produktionssystem – wurde in mehreren Testläufen umfassend geprüft und erfolgreich validiert. Dabei konnte die Funktionalität unter realitätsnahen Bedingungen nachgewiesen werden.

Mit Abschluss dieser Arbeiten steht nun ein robustes, KI-gestütztes neues Qualitätssicherungssystem zur Verfügung, das:

- vollständig in den Produktionsprozess integriert werden kann,
- Fehler automatisch erkennt und klassifiziert,
- eine lückenlose Rückverfolgbarkeit bis auf das einzelne Produkt ermöglicht,
- und beiträgt die regulatorischen Anforderungen für die Herstellung von Arzneimitteln besser zu erfüllen.

II.4.1 Bewertung der Zielerreichung

Produktcharakterisierung (DiHeSys / Relimetrics)

Ein weiterer zentraler Projekterfolg liegt in der erfolgreichen Implementierung eines Bildgebungssystems zur Analyse von ODFs im FlexDose-Drucker. DiHeSys hat hierfür ein vollständiges Softwaremodul entwickelt, das sowohl die Bilderfassung als auch die Bildübertragung und -bewertung umfasst.

Relimetrics ergänzte diesen Prozess durch die Auswahl und Implementierung geeigneter KI-Methoden, die als cloudbasierter Dienst zur Verfügung gestellt wurden. Nach einer intensiven, kooperativen Optimierung der Tinten, der ODF-Materialien und des Bildgebungsprozesses konnte ein umfangreiches KI-Training mit einer großen Anzahl an Bilddaten durchgeführt werden. Das Ergebnis ist ein zuverlässiger und wirtschaftlich tragfähiger Erkennungsprozess, der die Qualitätskontrolle im Produktionsprozess signifikant verbessert.

Erfüllung der Zielstellung

Die im Antrag und der Vorhabenbeschreibung festgelegten Projektziele wurden in vollem Umfang erreicht. Das entwickelte System ermöglicht erstmals eine echtzeitfähige, KI-basierte Inprozesskontrolle, -steuerung und -regelung sowohl im 3D-Metalldruck als auch im Medikamentendruck.

Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt

Mit der Kombination von Active Learning, Few-Shot-Learning und cloudbasierter KI-Infrastruktur wurde ein innovativer Ansatz für die Produktionstechnik umgesetzt. Die Ergebnisse sind wissenschaftlich publizierbar und haben erhebliches Transferpotenzial.

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die entwickelten Lösungen sind bereits in bestehende und kommende Produktgenerationen der Industriepartner integrierbar. Die Projektergebnisse bieten eine solide Grundlage für die Erschließung neuer Märkte und die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.

II.4.2 Verwertung und Schutzrechte

Im Rahmen des KIKA-IPK-Projekts basieren die wesentlichen Innovationen primär auf softwarebezogenen Verfahrensentwicklungen und domänenspezifischem Prozesswissen. Die eingesetzten Hardwarekomponenten – etwa für Bildgebung oder Tropfensteuerung – waren

durchgängig handelsüblich und frei am Markt verfügbar. Die im Projekt neu konzipierte Anordnung und Nutzung dieser Komponenten begründen aus patentrechtlicher Perspektive keine hinreichende Erfindungshöhe im Sinne eines Geräte- oder Verfahrenspatents.

Der eigentliche Innovationsschwerpunkt lag in der Entwicklung spezifischer Algorithmen und Softwaremodule, die das im Projektverlauf generierte Wissen – insbesondere zur KI-gestützten Bildverarbeitung, Tropfenanalyse und pharmazeutischen Produktionspraxis – in die Systemarchitektur überführen. Da Software nach geltendem deutschen und internationalem Patentrecht in der Regel nicht patentierbar ist, lassen sich die erarbeiteten Lösungen auf diesem Weg nicht durch gewerbliche Schutzrechte absichern.

Nichtsdestotrotz stellt der im Projekt erworbene Wissenszuwachs – insbesondere die Kombination aus KI-Methodik, domänenspezifischer Bildanalyse und prozesssicherer Integration in pharmazeutische Produktionsumgebungen – einen erheblichen immateriellen Vermögenswert dar. Dieses spezifische Know-how verschafft Relimetrics einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil in der Entwicklung neuer Produktgenerationen sowie bei der Optimierung bestehender Fertigungsprozesse im Bereich der personalisierten Arzneimittelherstellung.

Somit sind die im Projekt entwickelten Verfahren und Erkenntnisse nicht nur von technologischer, sondern auch von strategischer Bedeutung und stärken die langfristige Positionierung des Unternehmens in einem hochdynamischen Marktumfeld.

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

Während der Laufzeit des Projekts KIKA-IPK wurden kontinuierlich relevante Entwicklungen und Forschungsergebnisse im Bereich der KI-gestützten Inprozesskontrolle und additiven Fertigung beobachtet und bewertet. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Maschinelles Sehen und Bildverarbeitung

Bereits vor Projektbeginn existierten industrielle Lösungen zur optischen Qualitätskontrolle, z. B. für Oberflächeninspektion und Maßprüfung. In jüngster Zeit wurden die Verfahren weiter optimiert, insbesondere durch „Deep Learning“-Ansätze (CNN, GAN), die Bildmerkmale mit hoher Genauigkeit klassifizieren können.

Neuere Veröffentlichungen und Projekte, z. B. aus dem Bereich des Laserauftragsschweißens und der pulverbettbasierten additiven Fertigung, zeigen, dass ML-Modelle in der Lage sind, Prozessanomalien in Echtzeit zu detektieren und teilweise auch Prozessparameter vorzuschlagen.

Active Learning und Human-in-the-Loop

In mehreren internationalen Forschungsprojekten wird die Kombination von menschlichem Expertenwissen und maschinellem Lernen zur Prozessüberwachung und -steuerung vorangetrieben. Besonders hervorzuheben ist die Nutzung von Active-Learning-Strategien, um KI-Modelle auch mit wenig Daten fortlaufend zu verbessern. Die „Mensch-KI-hybride“ Intelligenz wird zunehmend als Standard etabliert, jedoch meist auf einzelne Prozessschritte beschränkt.

Event Stream Processing und Cloud-Technologien

Im Kontext von Industrie-4.0-Initiativen wurden ereignisgesteuerte Architekturen und Datenstreaming-Lösungen (z. B. Apache Kafka, CEP) weiterentwickelt. Die Echtzeitverarbeitung großer Sensordatenmengen und deren Nutzung für KI-basierte Prozessüberwachung sind Stand der Technik, jedoch fehlt häufig die nahtlose Kopplung an adaptive Regelalgorithmen.

Few-/Zero-Shot-Learning

Neue wissenschaftliche Arbeiten zeigen, dass ML-Modelle inzwischen auch mit sehr wenigen gelabelten Daten robust trainiert werden können. Die Übertragung dieser Ansätze auf die industrielle Fertigung – etwa für neue Werkstoffe oder Produkte – wird aktuell intensiv erforscht, ist aber in der Praxis bislang selten umgesetzt.

II.5.1 Abgrenzung und Neuheit des eigenen Vorhabens

Korrelation von Bildmerkmalen mit Prozesseigenschaften:

Während externe Projekte meist die reine Fehlererkennung im Fokus haben, verfolgt KIKA-IPK einen domänenübergreifenden Ansatz, bei dem Bildmerkmale direkt mit Prozessdaten verknüpft und adaptive Korrekturen abgeleitet werden. Diese umfassende, selbstlernende Korrelation ist weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal des Projekts.

Integration und Modularität

Im Gegensatz zu vielen Einzelentwicklungen im Markt wurde im KIKA-IPK-Projekt eine skalierbare Cloudplattform mit standardisierten Schnittstellen realisiert, die eine einfache Anbindung unterschiedlicher Produktionssysteme und KI-Modelle ermöglicht. Das Streaming-Konzept (Kafka) ist dabei auf industrielle Skalierbarkeit ausgelegt. Die im Projekt entwickelten Lösungen wurden in realen industriellen Umgebungen (3D-Metalldruck, Medikamentendruck) prototypisch validiert. Ähnliche Praxisdemonstratoren wurden bei anderen Projekten bislang nur vereinzelt veröffentlicht.

II.5.2 Transfer und Austausch mit anderen Initiativen

Zusammenarbeit und Erfahrungsaustausch:

Das Konsortium war im engen Kontakt mit anderen ProLern-Projekten und relevanten Arbeitskreisen (z. B. CIRP, WGP, Siemensstadt 2.0). Ergebnisse aus anderen Projekten wurden zur Validierung der eigenen Methoden herangezogen und in Workshops und Konferenzen aktiv diskutiert.

Standardisierung und Dissemination:

Die entwickelten KIC-Schnittstellen und Assistenzwerkzeuge werden im Rahmen von Transfermaßnahmen und Fachpublikationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

II.6.1 Wirtschaftlicher Nutzen

Erschließung neuer Marktsegmente: Durch die Entwicklung und prototypische Demonstration KI-gestützter Inprozesskontrolle und -regelung im Medikamentendruck werden neue Marktsegmente adressiert, insbesondere für Anwendungen mit kleinen Losgrößen, hoher Individualisierung und hohen Qualitätsanforderungen (z. B. Medizintechnik, personalisierte Pharmazie).

Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit: Die Projektpartner – insbesondere die KMU – können ihre Marktposition durch innovative KI-Dienstleistungen ausbauen. Die Integration der entwickelten Cloud-Dienste bietet die Möglichkeit, neben Hardware auch skalierbare, softwarebasierte Geschäftsmodelle zu etablieren.

Effizienzsteigerung und Kostenreduktion: Die KI-gestützte Prozessüberwachung und -regelung führt zu einer signifikanten Reduktion von Ausschuss, Nacharbeit und Kalibrierungsaufwand. Die direkte Qualitätskontrolle verringert den Ressourcen- und Personaleinsatz und verkürzt die Markteinführungszeiten für neue Produkte.

Verwertungsperspektive: Die entwickelten KI-Modelle und Assistenzsysteme werden nach Projektende bis zur Produktreife weiterentwickelt und über Cloudplattformen (z. B. PSI-Cloud) als Dienstleistung vermarktet. Die Lösungen sind auf andere Fertigungsverfahren und Branchen übertragbar.

II.6.2 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Schließung einer Forschungslücke: Das Projekt liefert einen signifikanten Beitrag zum Stand der Technik, indem es aktive Lernverfahren (Active Learning, Few-/Zero-Shot-Learning) für die selbstlernende Korrelation von Bildmerkmalen und Prozesseigenschaften in die industrielle Praxis überführt.

Neue Methoden und Werkzeuge: Die Integration von Nutzerfeedback in den Trainingsprozess, die adaptive Prozesssteuerung und die skalierbare Einbettung in Cloud-Infrastrukturen schaffen eine neue Generation von Assistenzsystemen für die Produktionstechnik.

Transferpotenzial: Die im Projekt entwickelten Methoden (z. B. KI-basierte Tropfenerkennung, adaptive Prozesskalibrierung) können in verwandte Bereiche wie Bioprinting, Lebensmitteltechnik oder Mikrofluidik übertragen werden.

Ausbildung und Qualifizierung: Die enge Zusammenarbeit mit der TU Berlin ermöglicht die Ausbildung neuer KI-Fachkräfte mit Prozesskompetenz und fördert wissenschaftliche Publikationen und Konferenzbeiträge.

II.6.3 Gesellschaftlicher Nutzen

Individuelle Gesundheitsversorgung: Die Automatisierung und Qualitätssicherung beim Medikamentendruck ermöglicht eine präzisere, individualisierte Arzneimittelherstellung – ein wichtiger Beitrag zur personalisierten Medizin und zur sicheren Versorgung von Patienten.

Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung: Die Reduktion von Ausschuss, Material- und Energieverbrauch in der Fertigung trägt zu einer nachhaltigeren Produktion und Schonung von Ressourcen bei.

Demokratisierung von Hightech-Anwendungen: Durch die bedienerfreundlichen Assistenzsysteme können auch weniger erfahrene Anwender komplexe Fertigungsprozesse sicher steuern. Dies senkt die Einstiegshürden für kleine und mittlere Unternehmen sowie neue Marktteilnehmer.

Konkrete Planungen und Verwertungsstrategie

Zeitraum	Geplante Schritte / Maßnahmen
Kurzfristig (0–12 Monate)	<ul style="list-style-type: none"> • Produktnahe Weiterentwicklung der KI-Modelle und Integration in aktuelle Produktsysteme • Pilotprojekte und Kundentests bei Industriepartnern • Fortführung der Zusammenarbeit im Konsortium und mit assoziierten Partnern
Mittelfristig (1–2 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> • Vermarktung der KI-Cloud-Dienste über PSI und Partnerunternehmen • Erweiterung auf weitere Anwendungsfelder und Branchen • Integration der Lösungen in neue Generationen von Druckern und Produktionsanlagen • Veröffentlichung und Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse
Langfristig (3–5 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau der KI-basierten Dienstleistungen zum Standard in der additiven Fertigung • Internationalisierung und Übertragung auf weitere Märkte • Weiterentwicklung der Methoden für zusätzliche Anwendungsbereiche (z. B. Bioprinting, Lebensmittelindustrie)

II.6.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Projektergebnisse sind modular und skalierbar gestaltet und können flexibel auf unterschiedliche industrielle Szenarien übertragen werden. Die Cloud-Architektur ermöglicht eine einfache Anbindung neuer Maschinen und Produktionsumgebungen. Die entwickelten Methoden und das erworbene Know-how bilden die Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte (z. B. im Bereich digitalisierte Produktion, Smart Manufacturing, individualisierte Medizin).

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Im Rahmen des KIKA-IPK-Projekts wurden vielfältige Aktivitäten zur Zusammenarbeit, Vernetzung und zum Erfahrungsaustausch mit externen Akteuren und Initiativen durchgeführt, um den Wissenstransfer, die externe Validierung sowie die Verwertung und Dissemination der Projektergebnisse sicherzustellen.

Workshops und Projekttreffen

Die enge Abstimmung mit assoziierten Partnern wie flying-parts (1. Demonstrator, 3D-Metalldruck) und Gen-Plus GmbH (2. Demonstrator, Medikamentendruck) ermöglichte es, Endanwenderanforderungen frühzeitig zu berücksichtigen und eine praxisnahe Entwicklung der Demonstratoren sicherzustellen. Beide Partner wurden regelmäßig zu externen Treffen eingeladen und konnten so aktiv die anwendungsorientierte Ausrichtung des Projekts mitgestalten.

Fachlicher Austausch und Transfermaßnahmen

Der Austausch mit weiteren ProLern-Projekten wurde gezielt gefördert, etwa durch die Teilnahme an projektübergreifenden Workshops und gemeinsamen Transfermaßnahmen. Ziel war es, die entwickelten ML-Modelle und KIC-Dienste extern vergleichbar zu machen und Synergien im Bereich KI-basierte Produktionstechnik zu erschließen.

So z.B. am 18.10.2023 beim 2. Koordinatorentreffen in den Themenfeldern „Lernende Produktionstechnik – Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion (ProLern)“ und „Demonstrations- und Transfernetzwerks KI in der Produktion (ProKI-Netz)“

Beitrag zu Standardisierung und Dissemination

Die entwickelten KIC-Schnittstellen und KI-Dienste wurden im Rahmen von Transfermaßnahmen und Fachpublikationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Ein White Paper zur Steigerung der Effizienz durch KI in der additiven Fertigung ist in Vorbereitung.

Integration von Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern:

Über die TU Berlin wurden Studierende und Nachwuchswissenschaftler in das Forschungsvorhaben eingebunden, insbesondere im Bereich Machine Learning, Bildverarbeitung und Produktionsautomatisierung. Dies erfolgte sowohl durch Mitarbeit in den Arbeitspaketen als auch durch spezifische Schulungsmaßnahmen.

Workshops und interne Trainings:

Im Projektkonsortium wurden regelmäßig Workshops durchgeführt, in denen Methoden, Tools und Ergebnisse für alle Partner und deren Mitarbeitende vermittelt wurden. Der Wissenstransfer wurde durch technische Dokumentationen und Lastenhefte unterstützt.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Die Projektergebnisse werden über eine öffentlich zugängliche Projektwebsite, Beiträge in Fachzeitschriften und Präsentationen auf Messen verbreitet. Das Konsortium beteiligt sich aktiv an öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen des BMBF (z. B. Tagungen, Innovationsplattformen). Es wurde fernere unter Federführung der TU Berlin ein Werbefilm erstellt.

II.9 Literaturverzeichnis

Settles, B. (2012). Active learning. *Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, 6(1), 1–114. <https://doi.org/10.2200/S00429ED1V01Y201207AIM018>

Wang, Y., Yao, Q., Kwok, J. T., & Ni, L. M. (2020). Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning. *ACM Computing Surveys*, 53(3), 1–34. <https://doi.org/10.1145/3386252>

Xian, Y., Schiele, B., & Akata, Z. (2018). Zero-shot learning—A comprehensive evaluation of the good, the bad and the ugly. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(9), 2251–2265. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2857768>

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 27). <https://proceedings.neurips.cc/paper/2014/hash/5ca3e9b122f61f8f06494c97b1afccf3-Abstract.html>

Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines – Industrial requirements and technological challenges. *CIRP Annals*, 58(2), 628–646. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>

Luckham, D. C. (2002). *The power of events: An introduction to complex event processing in distributed enterprise systems*. Addison-Wesley.

Scime, L., & Beuth, J. (2019). Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm. *Additive Manufacturing*, 19, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.009>

Cunningham, R., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J., & Rollett, A. D. (2017). Synchrotron-based X-ray microtomography characterization of additive manufacturing processes. *JOM*, 69, 479–484. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2249-2>