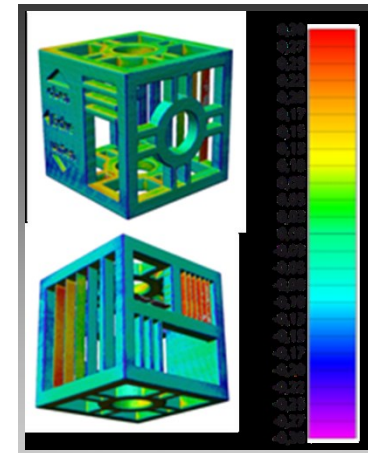


INTELLIGENTE QUALITÄTSSICHERUNG IN DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Inline-Qualitätskontrolle für pulverbasierte Verfahren



Simina Fulga
Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und
Automatisierung IPA

Wer wir sind



Fraunhofer IPA

Forscher. Entwickler. Vordenker. Innovationstreiber seit 1959

- 70,8 Mio Euro Betriebshaushalt
- 25,8 Mio Euro Wirtschaftsertrag
- Mehr als 1.000 Mitarbeiter



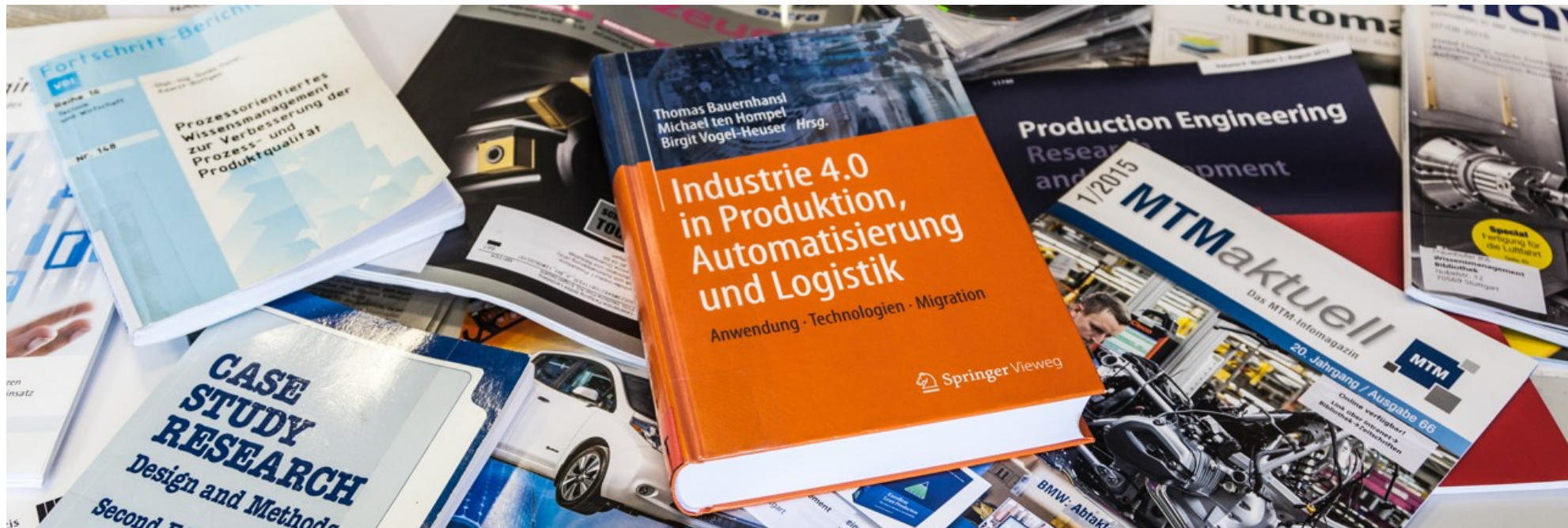
Neubau Technikum Gebäude D in Stuttgart



Fraunhofer-Institutszentrum Stuttgart

Fraunhofer IPA mit wissenschaftlicher Reputation

- 40 interne Erfindungsmeldungen
- 21 neue Patentanmeldungen und 24 erteilte Patente
- Annähernd 1.000 Veröffentlichungen



Hinweis: Zahlen beziehen sich auf das Gesamtjahr 2016

Zusammenarbeit auf höchstem Niveau

Was wir tun

Produkte entwickeln
und verbessern

Prozesse entwickeln
und verbessern

Technologien entwickeln
und verbessern

Bewerten, prüfen
und zertifizieren

Organisationen und Verfahren
optimieren

Märkte analysieren und zu
Innovationen beraten



Zusammenarbeit auf höchstem Niveau

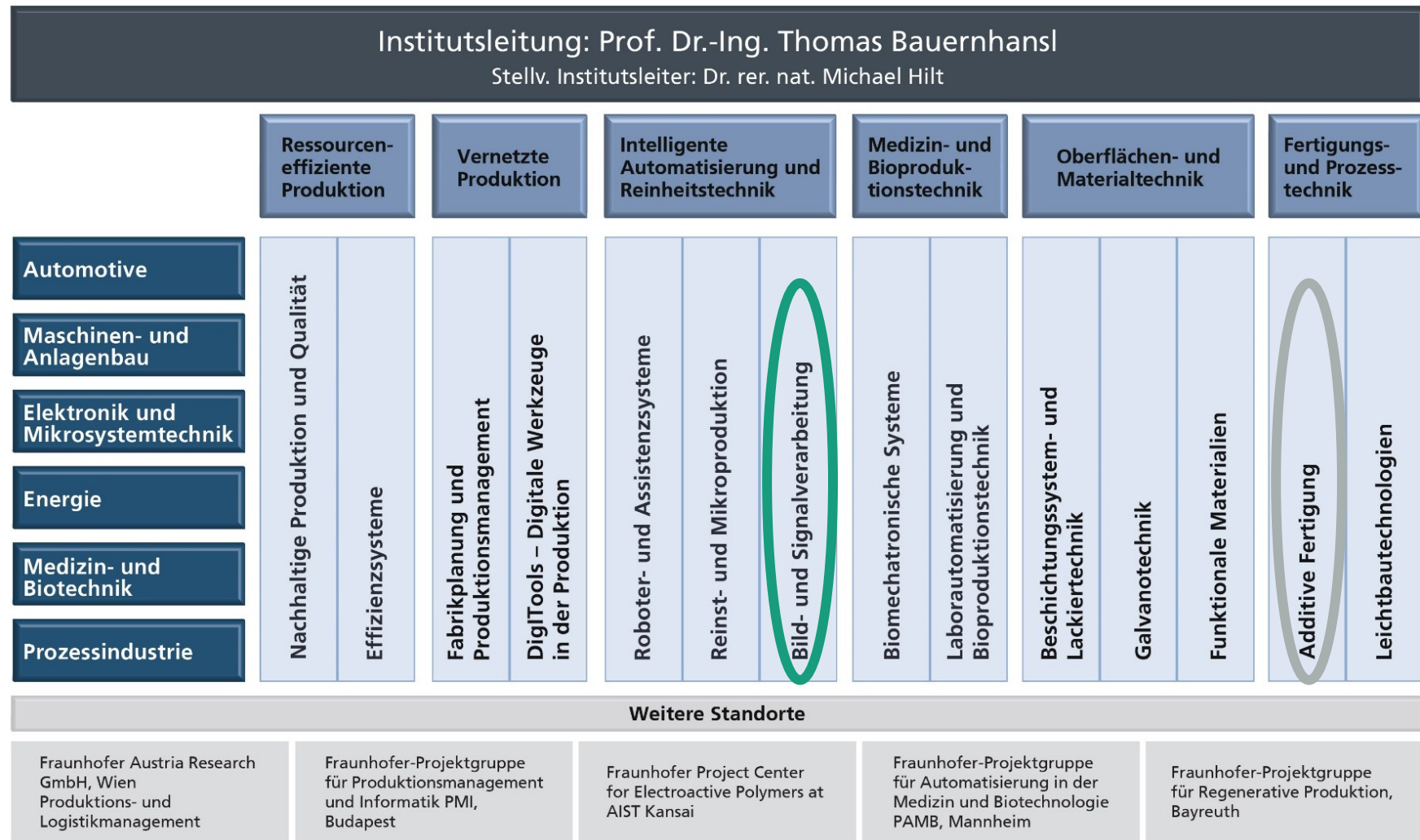
Was wir anbieten

- Einzelaufträge
- Großprojekte mit vielen Partnern
- Internationale Kooperationen
- Strategische Partnerschaften
- Innovationscluster
- Ausgründungen
- Lizenzen
- Weiterbildung



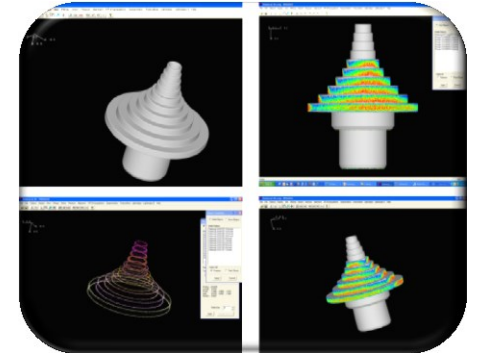
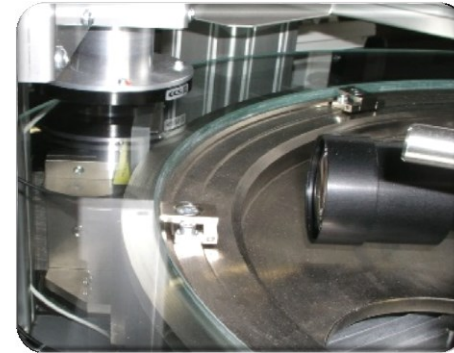
Fraunhofer IPA

mit einer interdisziplinären Organisation



Abteilung Bild- und Signalverarbeitung Kernkompetenz: Intelligente, automatisierte Interpretation von Bild- und Sensorinformationen

- 2D-Mess- und Prüftechnik
- 3D-Mess- und Prüftechnik
- 3D-Objekterkennung
- Statische Szenenanalyse
- Dynamische Szenenanalyse
- Prozessüberwachung und Qualitätsprognose





Inline-Qualitätskontrolle für die Additive Produktion

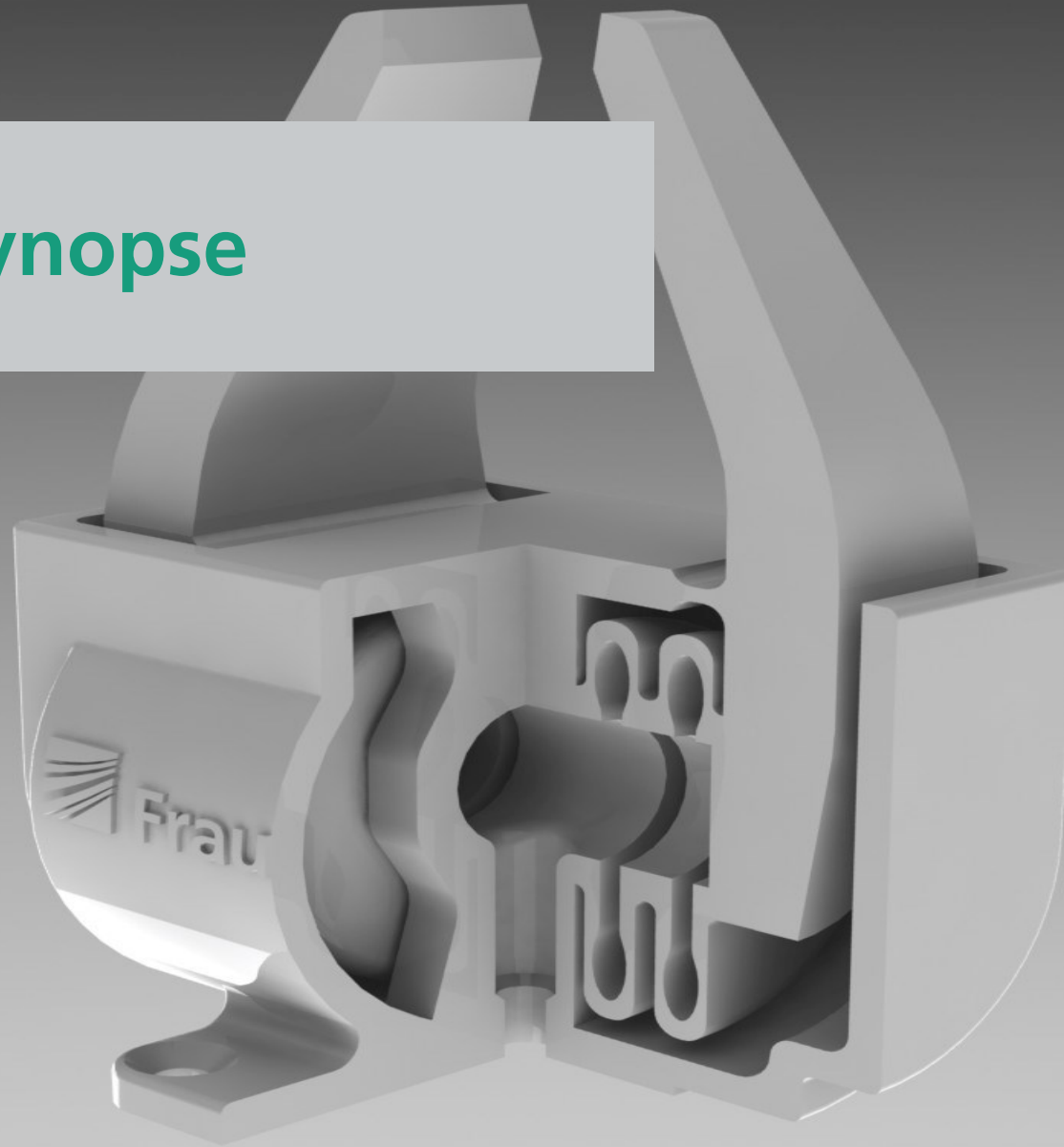
- IQ4AP -

Inline-Qualitätskontrolle für pulverbasierte Verfahren

Inhalt

- Präambel & Synopse
- Kundennutzen
- Inline-Defekten und -Fehlern
- Gesamtkonzept für die Inline-Qualitätskontrolle
- Implementierung: Hardware Setup
- Implementierung: Software Engine
- Zusammenfassung <—> IQ4AP Film

Präambel & Synopse



Kann die additive Fertigung im Bereich der industriellen Umgebung Einzug halten?

Aussagen über die Einhaltung von **Geometrietoleranzen und exakte quantifizierbare physikalische Parameter** im Sinne einer Produktzertifizierung **sind zwingend erforderlich.**

Je früher im Entstehungsprozess diese Parameter gewonnen oder gar beeinflusst werden können, umso höher ist die Effizienz.

Voraussetzung: Qualitätssicherung(QS)

dabei sind sowohl die **unmittelbare Prozessüberwachung** als auch die **QS und Datenintegration über die gesamte Prozesskette der Produktion** zu betrachten

IQ4AP am Beispiel des Selektiven Lasersinterns (SLS)

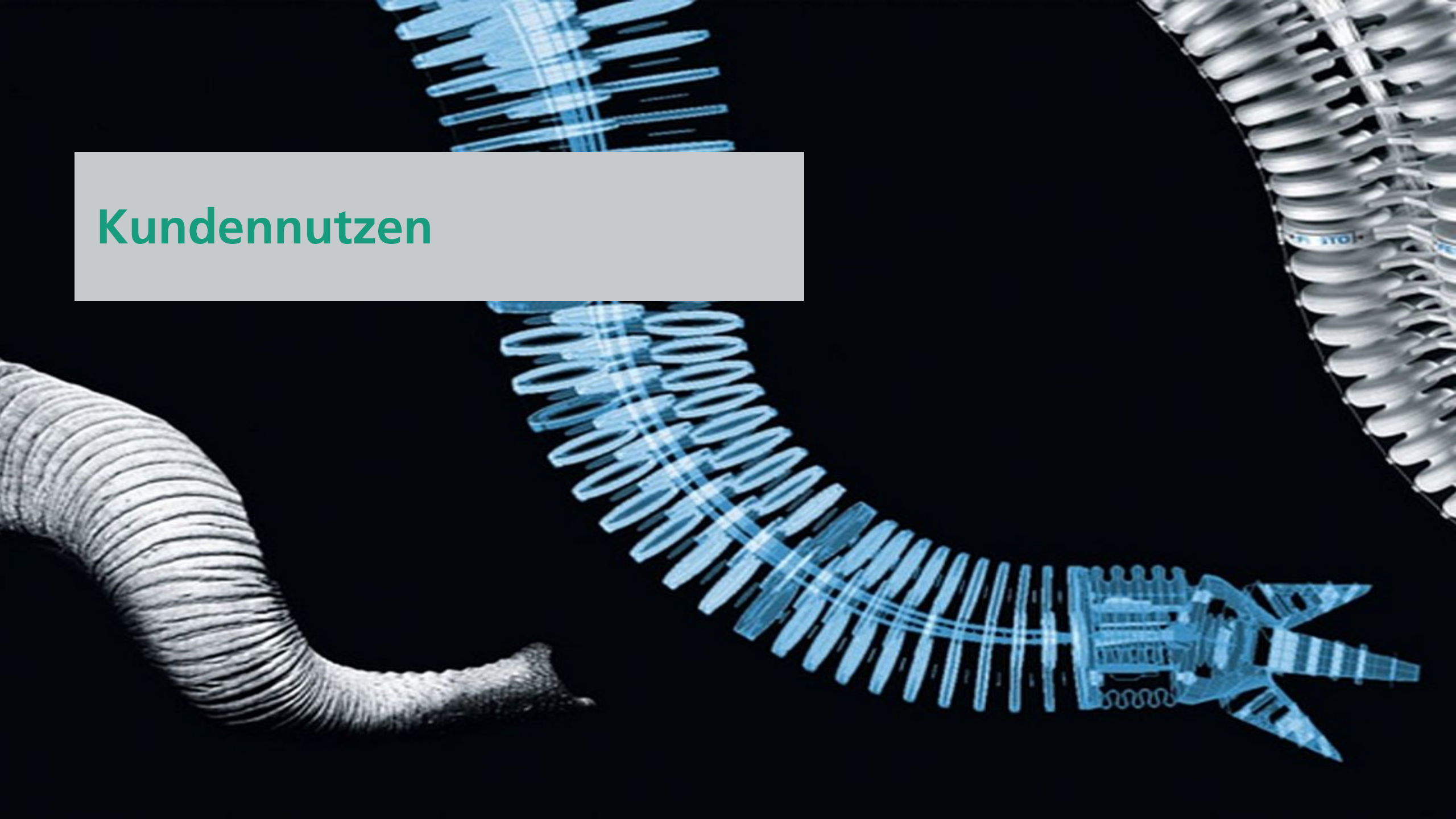
Synopse

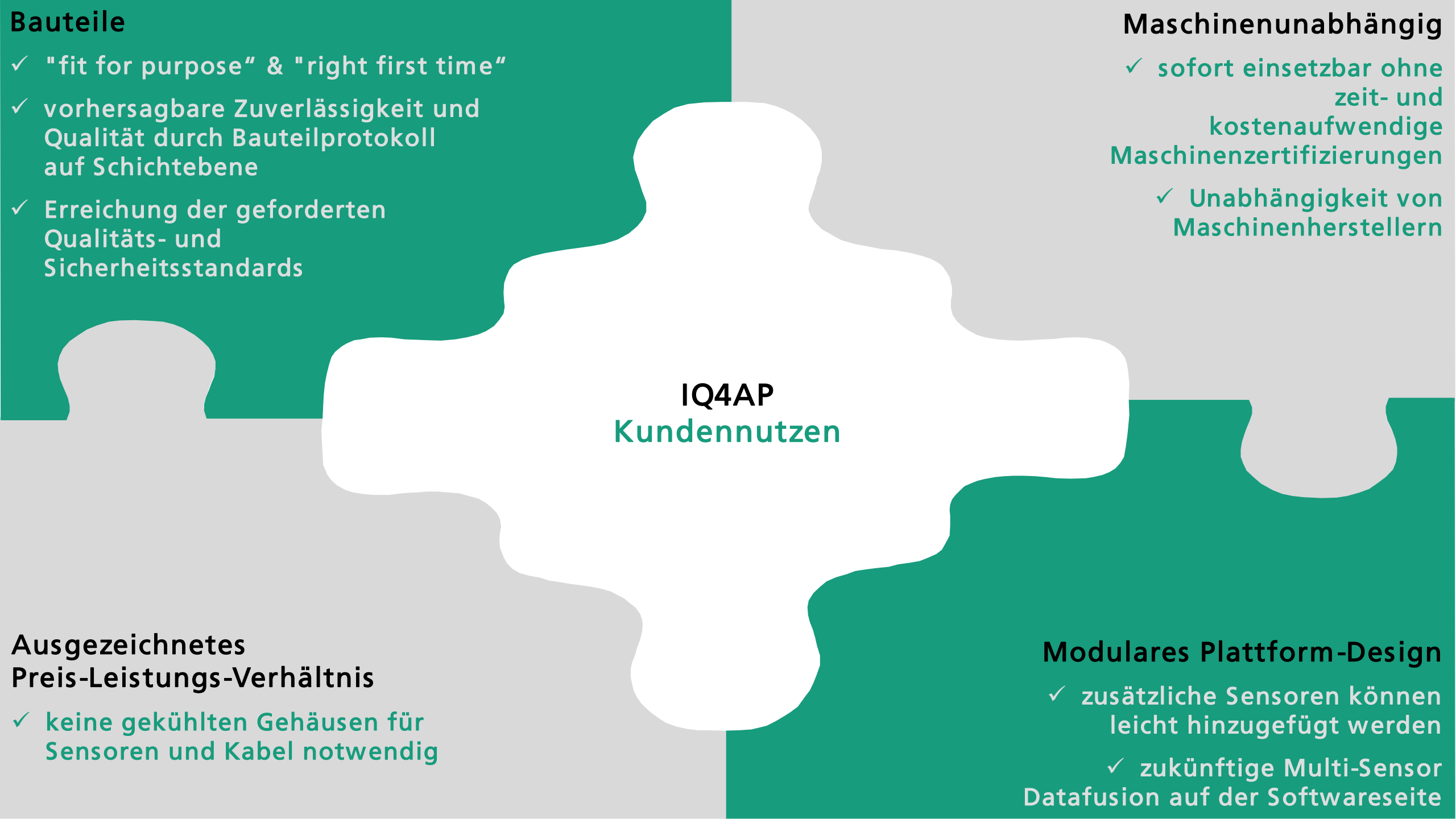


Modulare Hardware-Plattform ⇔ Technologien und Sensoren für die Datenerfassung
Modulare Software-Plattform ⇔ Industrial Image Processing (IIP) Software Engine
Entwicklung von **Algorithmen zur Bildaufnahme und Fehlerdetektion**
Bauteil Qualitätsprotokoll

Quelle: Simina Fulga; Fraunhofer IPA

Kundennutzen





IQ4AP
Kundennutzen

Bauteile

- ✓ "fit for purpose" & "right first time"
- ✓ vorhersagbare Zuverlässigkeit und Qualität durch Bauteilprotokoll auf Schichtebene
- ✓ Erreichung der geforderten Qualitäts- und Sicherheitsstandards

Maschinenunabhängig

- ✓ sofort einsetzbar ohne zeit- und kostenaufwendige Maschinenzertifizierungen
- ✓ Unabhängigkeit von Maschinenherstellern

Ausgezeichnetes Preis-Leistungs-Verhältnis

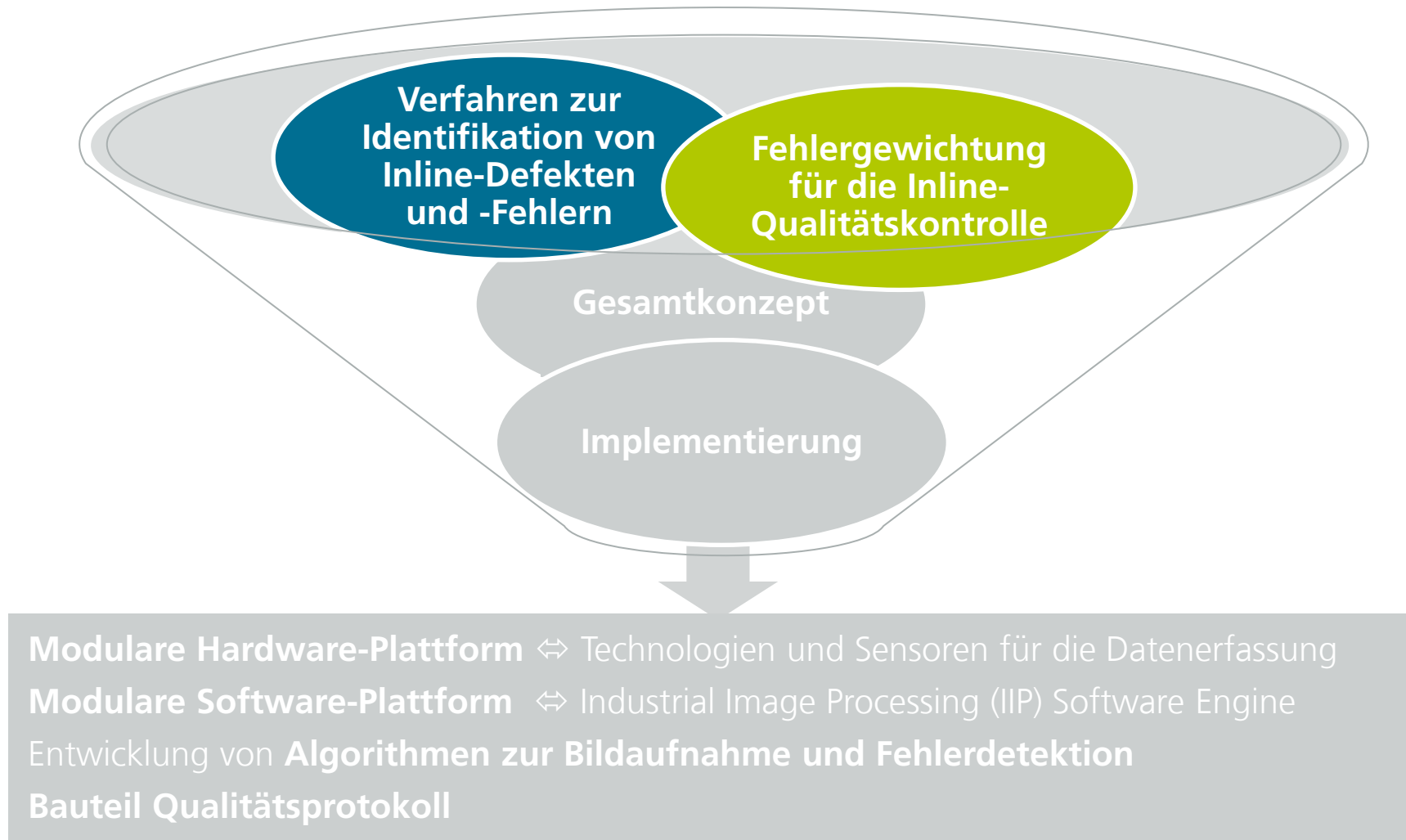
- ✓ keine gekühlten Gehäusen für Sensoren und Kabel notwendig

Modulares Plattform-Design

- ✓ zusätzliche Sensoren können leicht hinzugefügt werden
- ✓ zukünftige Multi-Sensor Datafusion auf der Softwareseite

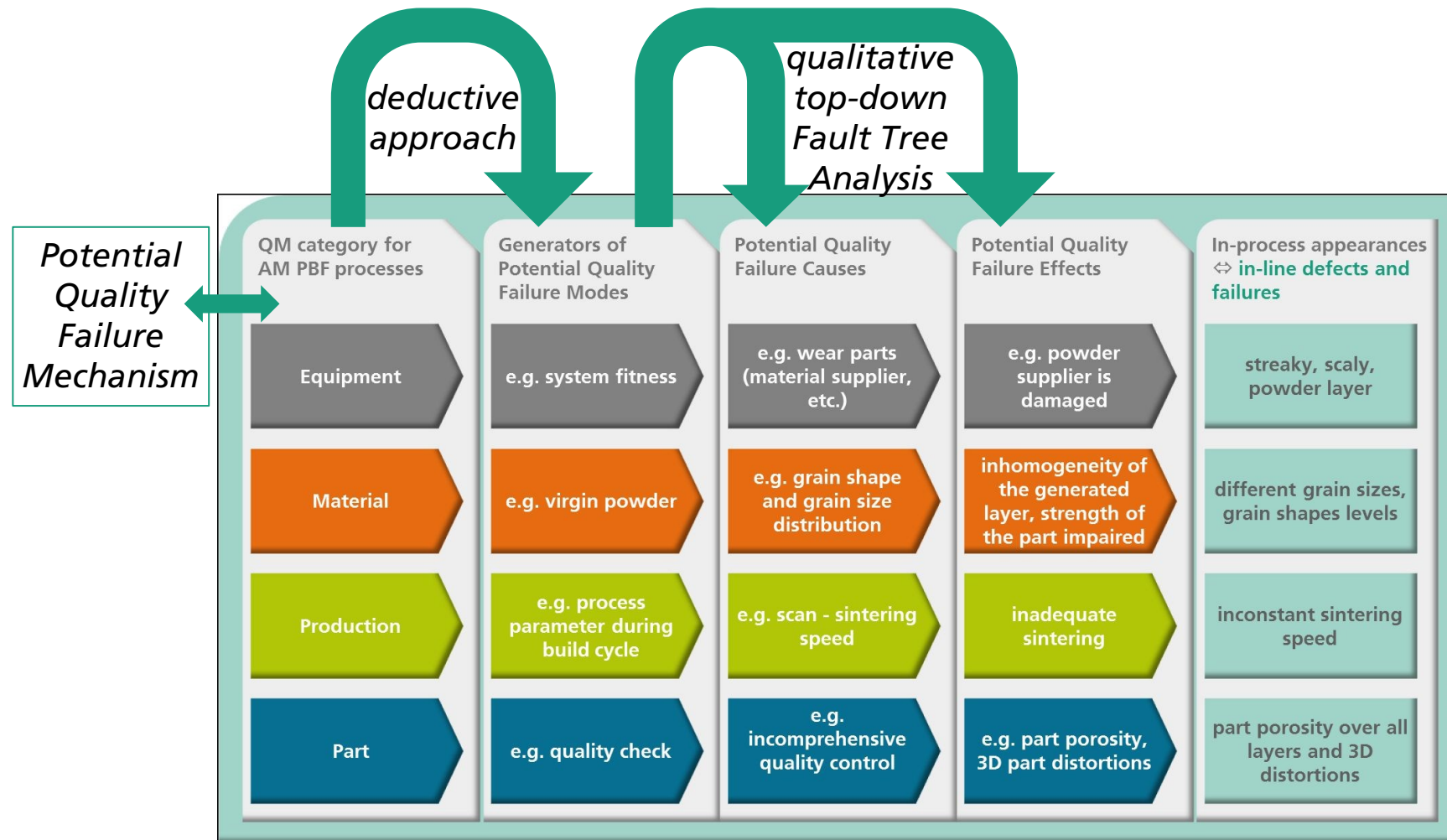
Inline-Defekten und -Fehlern





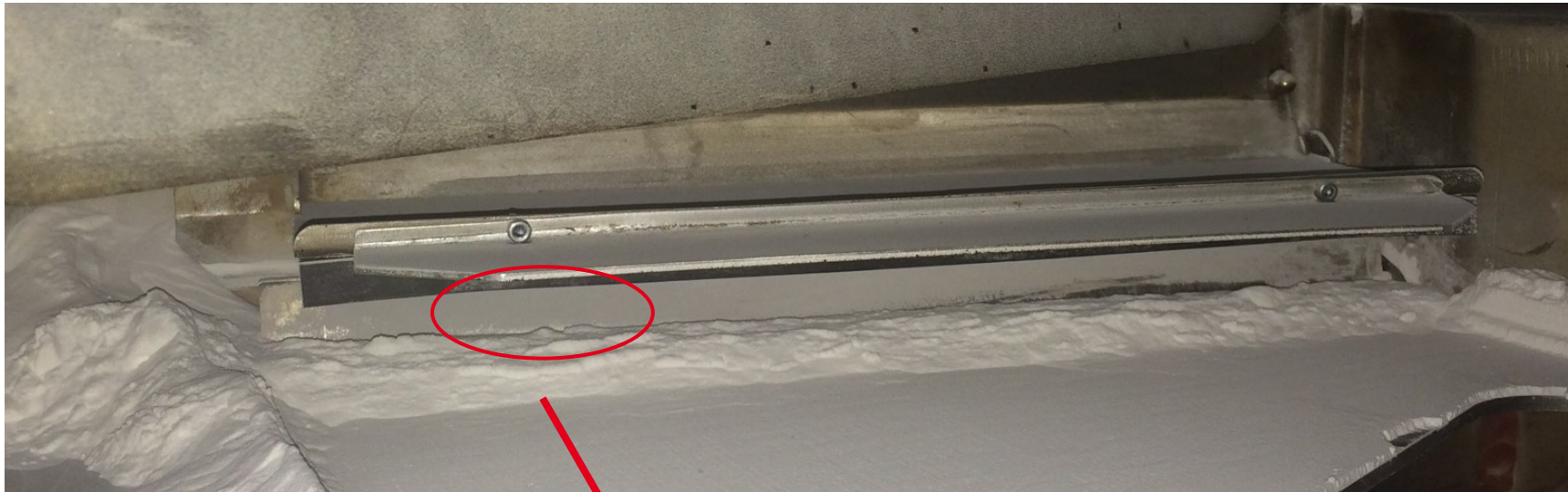
Inline-Defekte und -Fehler

Verfahren zur Identifikation



Quelle: [3]

Potential Quality Failure Causes	In-line defects and failures during the SLS process
deposits on laser window	<i>inappropriate layers' adhesion, geometrical layer and part distortions, deposits on laser window</i>
impurities	<i>impurities in layer</i>
laser and optical system	<i>inappropriate layers' adhesion, geometrical layer and part distortions, melting of the edge zone depending on the geometry, porosity</i>
temperature control	<i>inconstant temperature</i>
inert gas supply	<i>melting of the part, black sintered</i>
wear parts (e.g. seals, material supplier)	<i>streaky, scaly powder layer</i>
	<i>tilted layer geometry</i>
	<i>layers overlapping, layers sintering failed</i>
powder application performance	<i>inhomogeneity of the layer thickness</i>
	<i>density variation of the powder layer</i>
scaling	<i>geometrical deviations and distortions of the sintered layer</i>
tolerances	<i>geometrical deviations of the sintered layer</i>
beam offset	<i>geometrical deviations and distortions of the sintered layer</i>
low scan speed	<i>porosity, inhomogeneity</i>
surface roughness	<i>layer and part surface roughness</i>
grain shape and grain size distribution	<i>different grain sizes, grain shapes levels</i>
thermal properties like melting point and recrystallization	<i>inconstant temperature on sintering point, inappropriate layers' adhesion</i>
type and mesh size of sieve	<i>different grain size, inhomogeneity of the powder layer</i>
resolution of STL file	<i>high surface roughness</i>
part orientation	<i>part and layer orientation failure</i>
laser power	<i>inappropriate layers' adhesion, geometrical layer and part distortions, melting of the edge zone depending on the geometry, layer porosity</i>
scan, sintering speed	<i>inconstant sintering speed</i>
scan, sintering line	<i>scan line deviation</i>
temperature profile	<i>inconstant temperature on sintering point, inappropriate layers' adhesion</i>
layer thickness	<i>variation of layer thickness , inhomogeneity</i>
hatch distance	<i>inappropriate hatch distance, inappropriate layers' adhesion</i>
atmosphere	<i>melting of the part, black sintered</i>
skywriting	<i>skywriting length variations, melting of the edge zone, geometrical layer and part distortions</i>

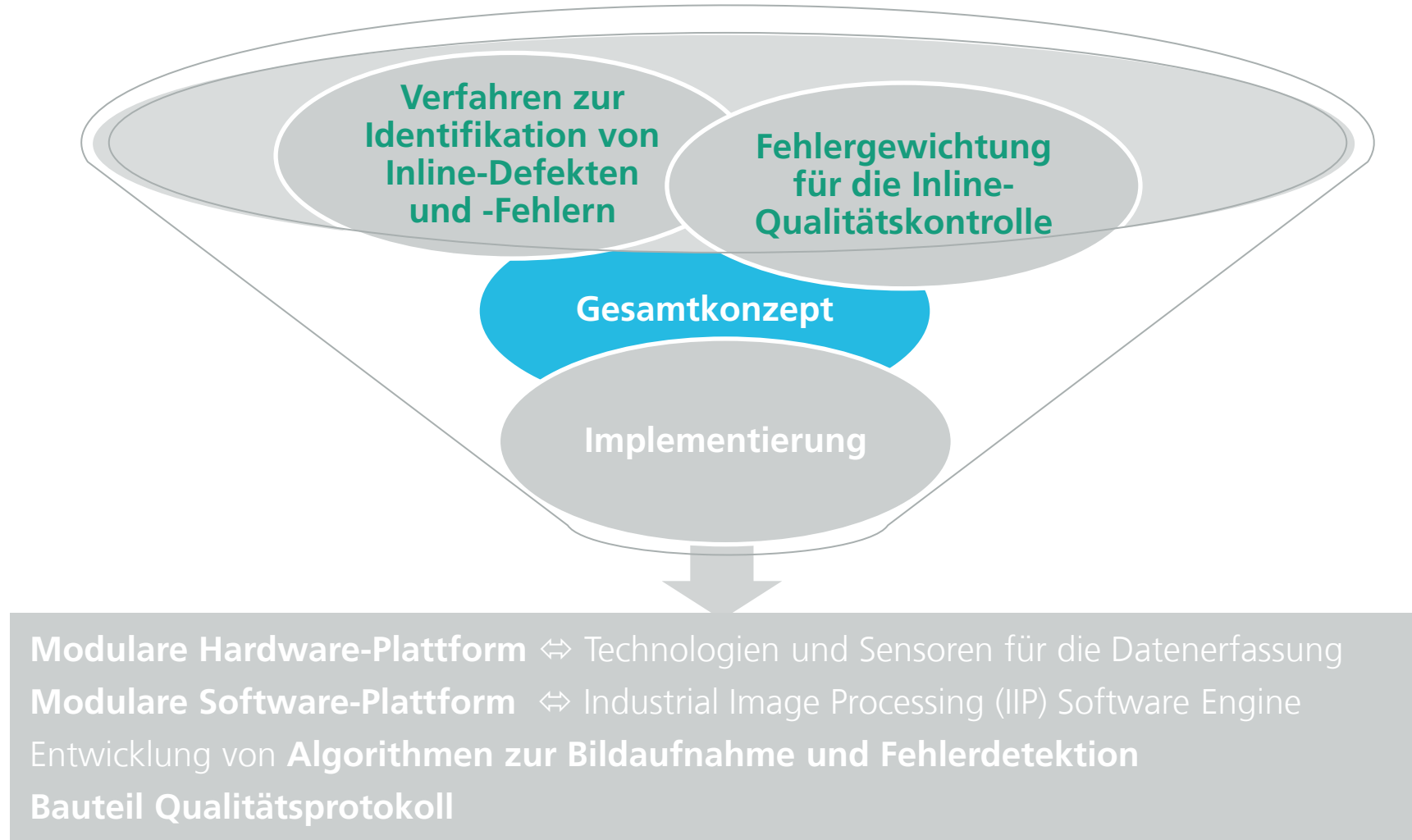


Quelle: Simina Fulga; Fraunhofer IPA

Ranking position	Frequency of defects in percent of build cycles (F_1)	Sunk costs in percent of one build cycle turnover (F_2)	Quality Failure Causes, logged over the screening time	Inline defects to be identified by the inline QC system ↔ tasks of the inline QC system
1	<10%	≤100%	deposits on laser window	<i>inappropriate layers' adhesion, geometrical layer and part distortions, deposits on laser window</i>
2	<15%	<25%	impurities	<i>impurities in layer</i>
1	<10%	≤100%	laser and optical system	<i>inappropriate layers' adhesion, geometrical layer and part distortions, melting of the edge zone depending on the geometry, porosity</i>
2	< 2%	<90%	temperature control	<i>inconstant temperature</i>
2	<3%	<50%	inert gas supply	<i>melting of the part, black sintered</i>
1	<5%	100%	wear parts: material supplier	<i>streaky, scaly powder layer</i>
1	<5%	100%	wear parts: tilted build platform	<i>tilted layer geometry</i>
1	<5 %	100%	wear parts: build platform get stuck or lose the high information because defects of the stepper motor	<i>layers' overlapping, layers' sintering failed</i>
1	<7%	≤90%	powder application performance: inhomogeneity of the generated powder layer	<i>inhomogeneity of the layer thickness</i>
2	<5%	<60%	powder application performance: density variation of the powder layer	<i>density variation of the powder layer</i>
3	<1%	<50%	tolerances: inadequate tolerances	<i>geometrical deviations of the sintered layer</i>
1	<20%	≤100%	improper beam offset	<i>geometrical deviations and distortions of the sintered layer</i>
2	<8%	≤80%	low scan speed	<i>porosity, inhomogeneity</i>

Gesamtkonzept für die Inline- Qualitätskontrolle





AM production steps	In-line defects to be identified by the in-line QC system ⇔ tasks of the in-line QC system (ranking position)
During all steps	deposits on laser window (1)
	inconstant temperature (2)
After each powder layer application	streaky, scaly powder layer (1)
	layer porosity (2)
	variation of layer thickness (2)
	density variations of the powder layer (2)
	impurities in powder layer(2)
	different grain size (2)
During sintering process of the powder layers	inconstant temperature on sintering point (1)
	melting of the edge zone depending on geometry (1)
	inconstant sintering speed (1)
	scan line deviation (1)
	melting of the part, black sintered (2)
	check the hatch distance (3)
	skywriting length check (3)
After sintering of each powder layer	layers' overlapping, layers' sintering failed (1)
	inappropriate layers' adhesion (1)
	layer and part surface roughness (1)
	geometrical deviations and distortions of the sintered layer (1)
	layer porosity (2)
	layer/part orientation within the build volume, only after sintering the first layer (3)
After part is finished sintered	geometrical deviations and distortions of the part (1)
	porosity analysis of the part over all layers (1)
	part surface roughness (1)

Gesamtkonzept für die Inline-Qualitätskontrolle

Hardwareplattform bzw. Technologien und Sensoren für die Daten- und Signalerfassung

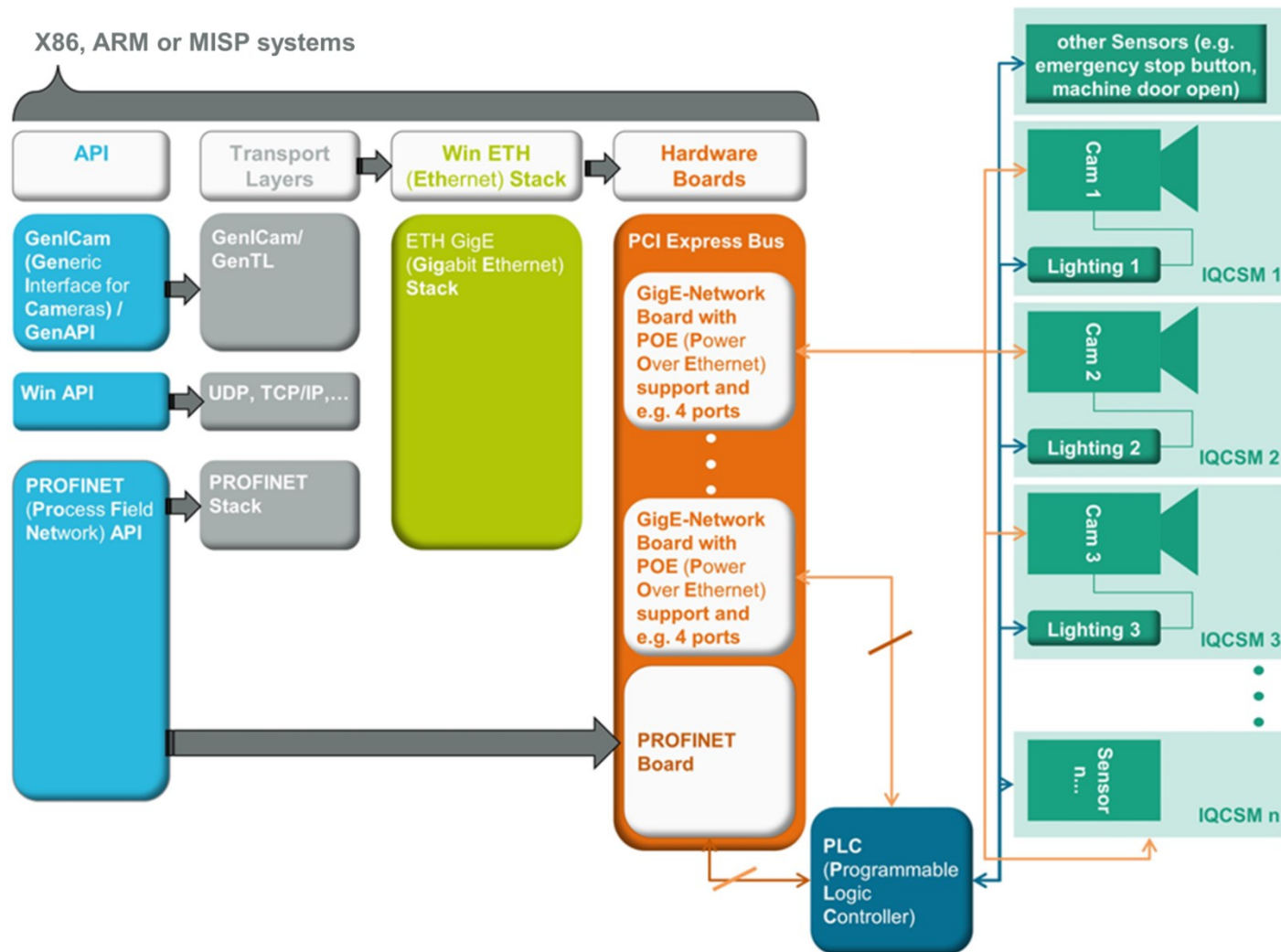
- eine **Hardware-Modularität** ist unerlässlich um:
 - **andere Sensoren** leicht hinzufügen zu können, um neue Qualitätsprobleme, die mit der Entwicklung der SLS-Maschinen auftreten, lösen zu können
 - eine **leichte Anpassung** des Inline-Qualitätskontrollsystems **an andere additive PBF Fertigungstechnologien** zu ermöglichen
 - eine **Datenfusion der Sensoren** auf der Software-Seite des Systems zu ermöglichen
- Technologien und Sensoren für die Daten- und Signalerfassung: beispielhaft für eine SLS-Maschine (Fa. EOS) sind **drei IQCSM (Inline Quality Control System Modules)** notwendig, um die klassifizierten Tasks zu lösen

Quelle: [2],[4]

IQCSM no.	Sensors for the data and signal acquisition	Tasks e.g.
1	Machine Vision System	must acquire <i>during all AM production steps</i> an image of the laser window as basis for <i>the laser window clean check</i>
2	Machine Vision System	must acquire <i>after each powder layer application</i> at least one image of the powder layer, for the inspection of: <i>streaky, scaly powder layer; layer porosity; impurities in powder layer and the powder grain size</i>
3	Thermography system	must assure <i>after sintering of each powder layer</i> the necessary images for a Lock-in Thermography of the sintered layer for the inspection of: <i>inappropriate layers' adhesion</i>

Gesamtkonzept für die Inline-Qualitätskontrolle

Hardwarekonzept und -schnittstellen des modularen IQ4AP Systems



Communication sensors
<->PC

- is based on a Gigabit Ethernet (GigE) interface

connection

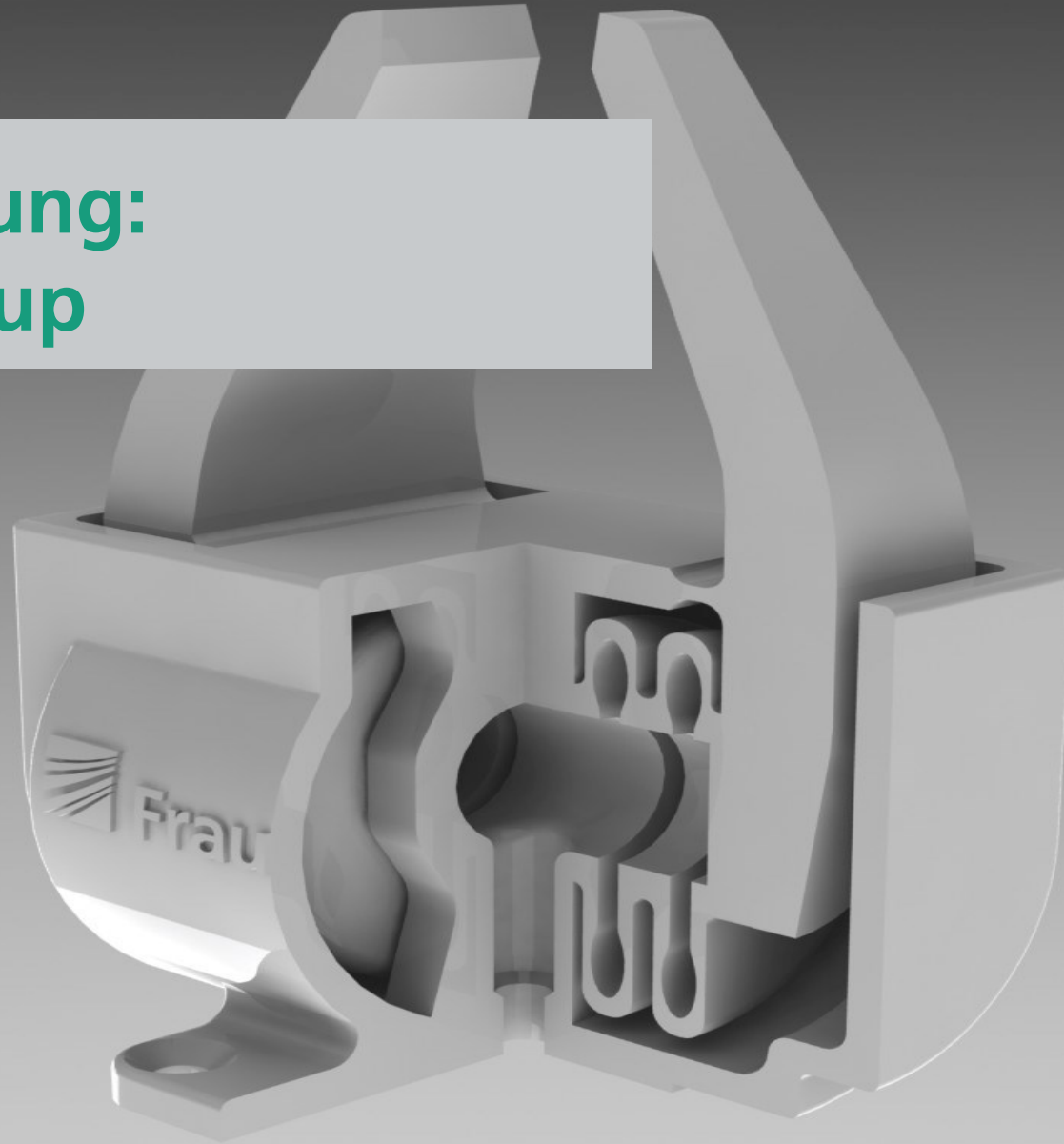
- to machine over PLC, based on PROFINET protocol
- for the sensors with a Generic Interface for Cameras protocol

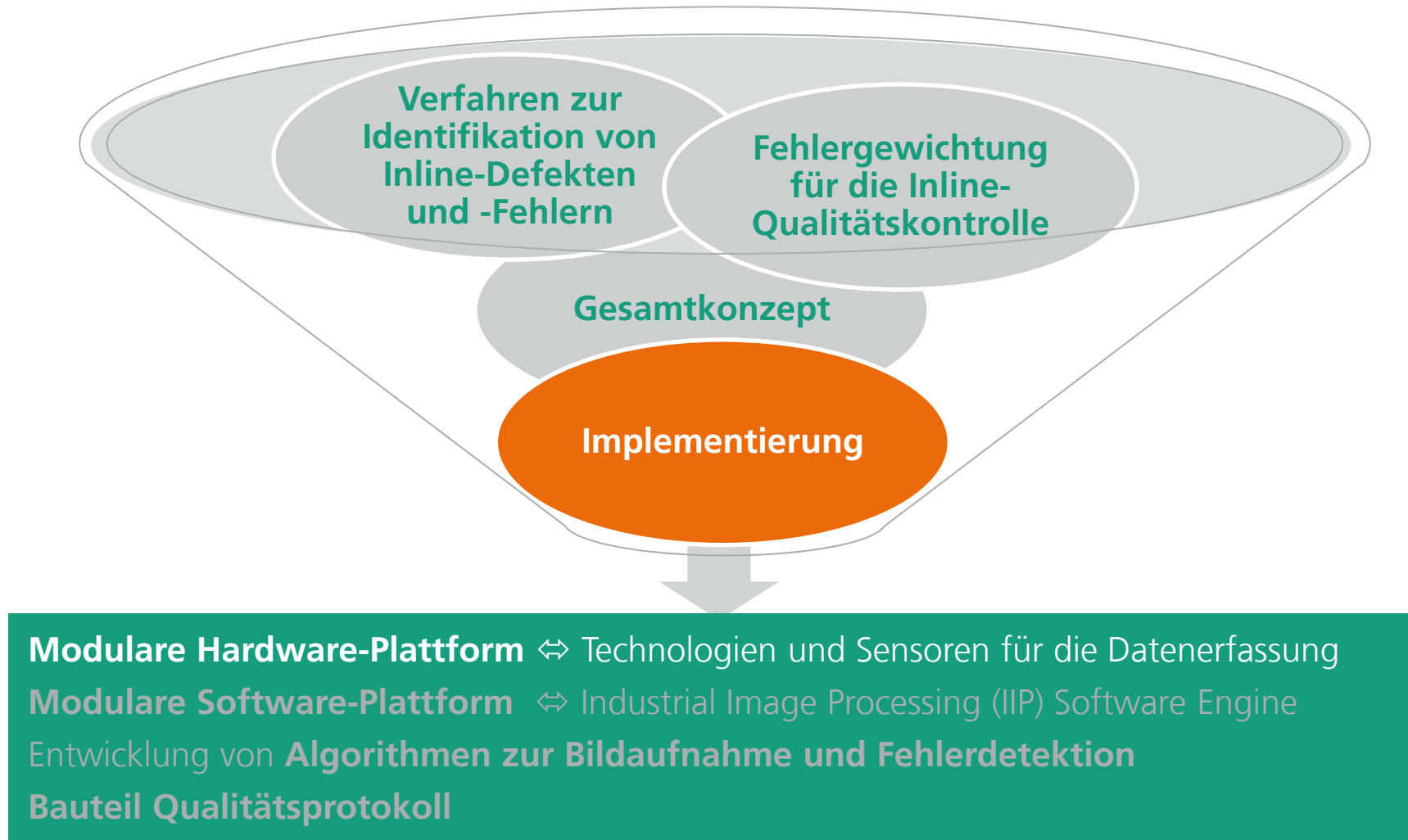
POE

- the data communication and sensor power supply assured only over one cable <-> big advantage

Quelle: [2],[4]

Implementierung: Hardware Setup

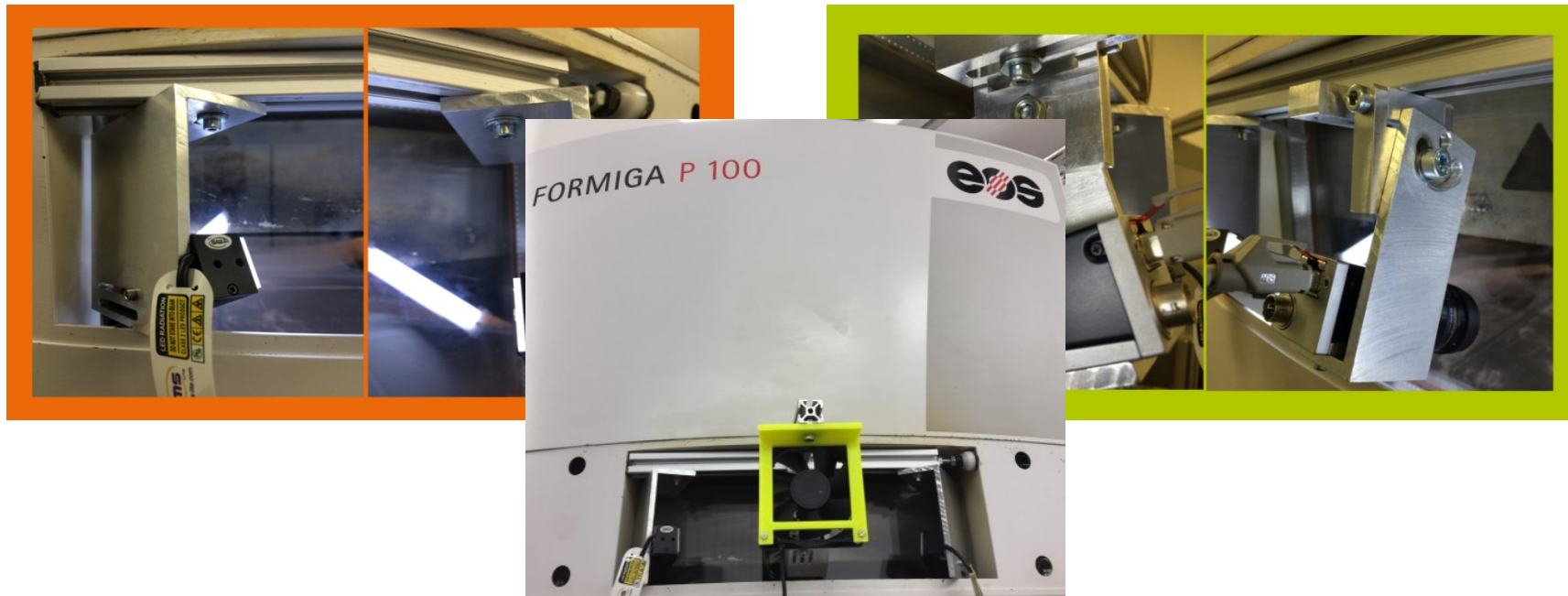




IQ4AP

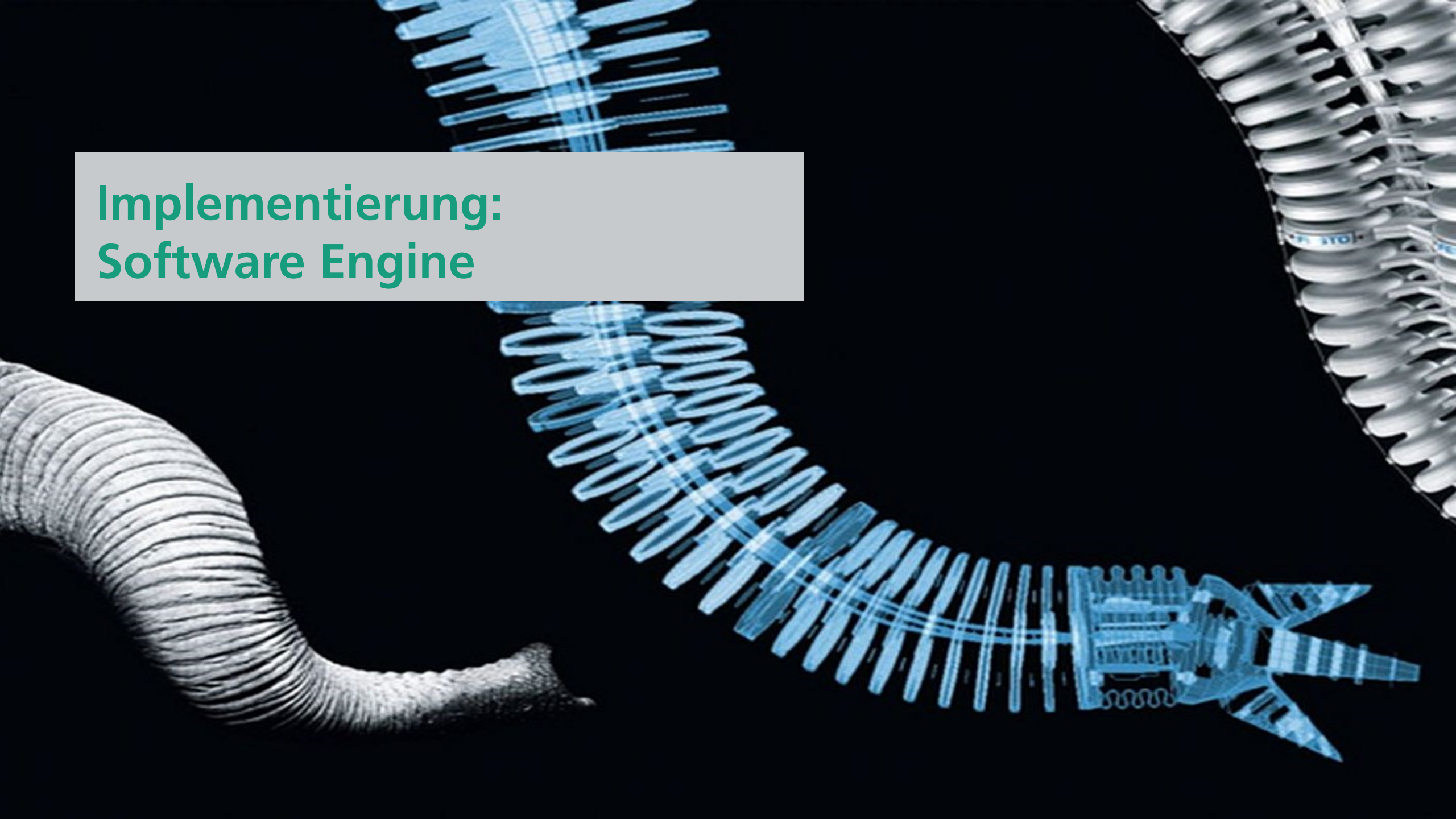
Hardware Setup

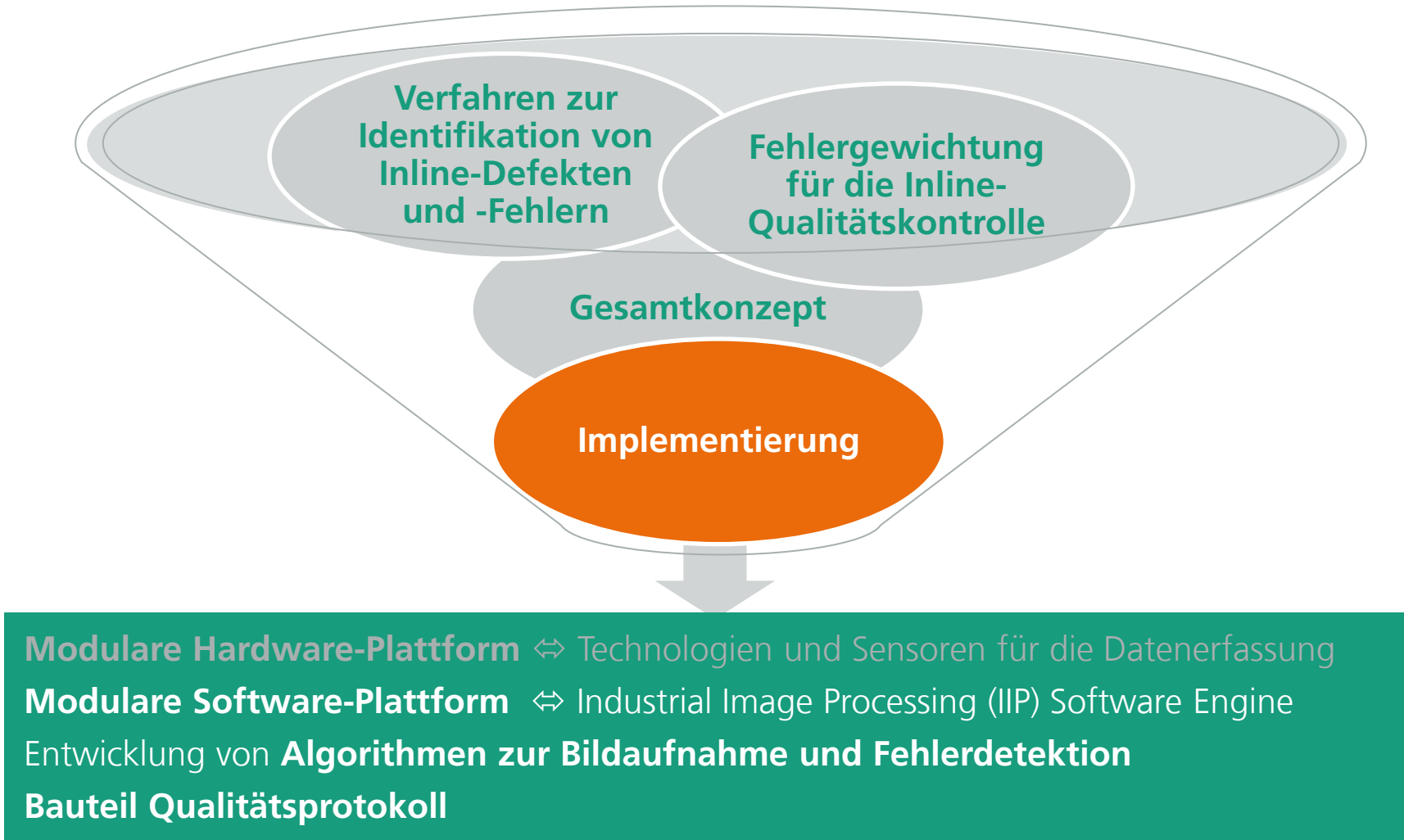
- Fokussiert auf das IQCSM 2 ⇔ PBF spezifisches **Machine Vision System**
- Entwicklung auf einer SLS Maschine von Typ EOS Formiga P100



Quelle: [4]

Implementierung: Software Engine

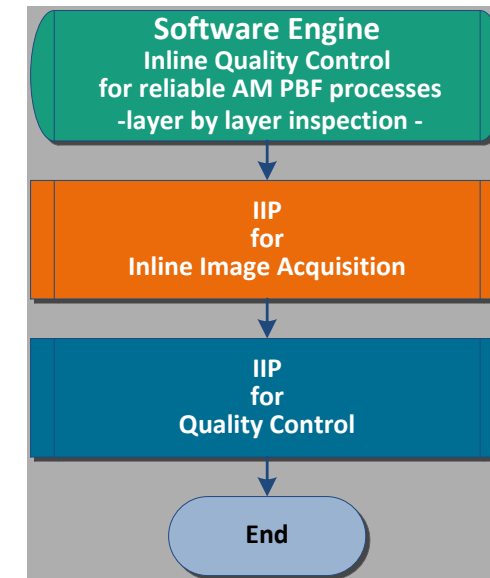




IQ4AP

Software Engine

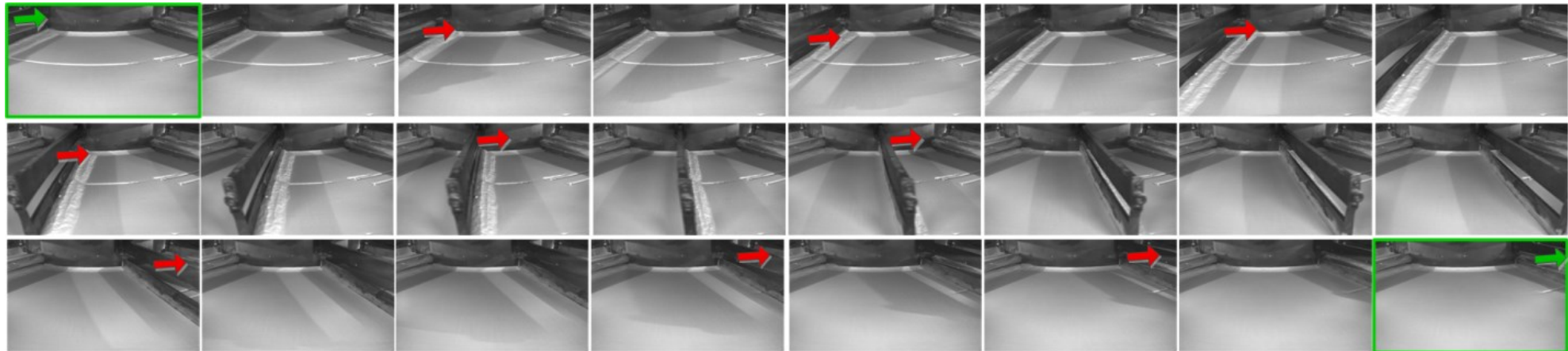
- besteht aus zwei Industrial Image Processing (IIP) Hauptroutinen: eine für die **inline Bildaufnahme** und eine für die **Qualitätskontrolle**
- Entwicklung:
 - alle Algorithmen als C++ Plug-ins
 - EyeVision3 modulares Framework ist integriert
<-> als Basis Entwicklungsumgebung (z.B. Bildeinzug und -speicher Management)
 - Open CV "imgproc" & "calib3D"
- die erreichte Modularität erlaubt eine einfache Integration neuer Algorithmen -> die HW Modularität ist von der SW Plattform direkt unterstützt
- Prozessor- (z.B. x86, ARM) und Betriebssystemunabhängigkeit (z.B. Windows, Linux)



Software Engine

IIP für die inline Bildaufnahme

- ein Maschinenunabhängiges System => die Datenakquisition kann nicht über ein Signal der Maschine getriggert werden => eine **Routine basierend auf live Bild Informationen detektiert die Bildaufnahme Zeitpunkt**
- ⇔ die erste Hauptroutine: „IIP for Inline Image Acquisition“



Quelle: Simina Fulga; Fraunhofer IPA

Software Engine

IIP für die inline Bildaufnahme



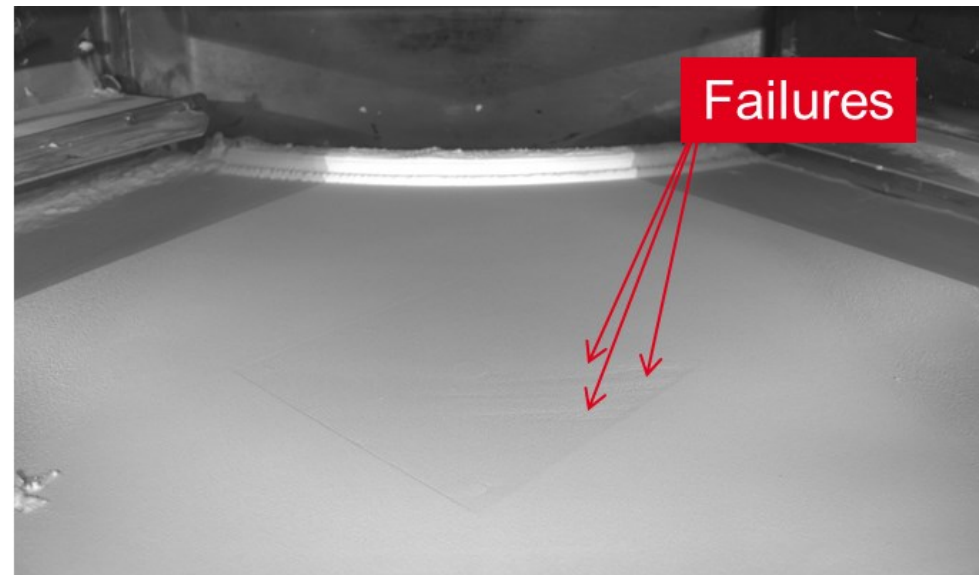
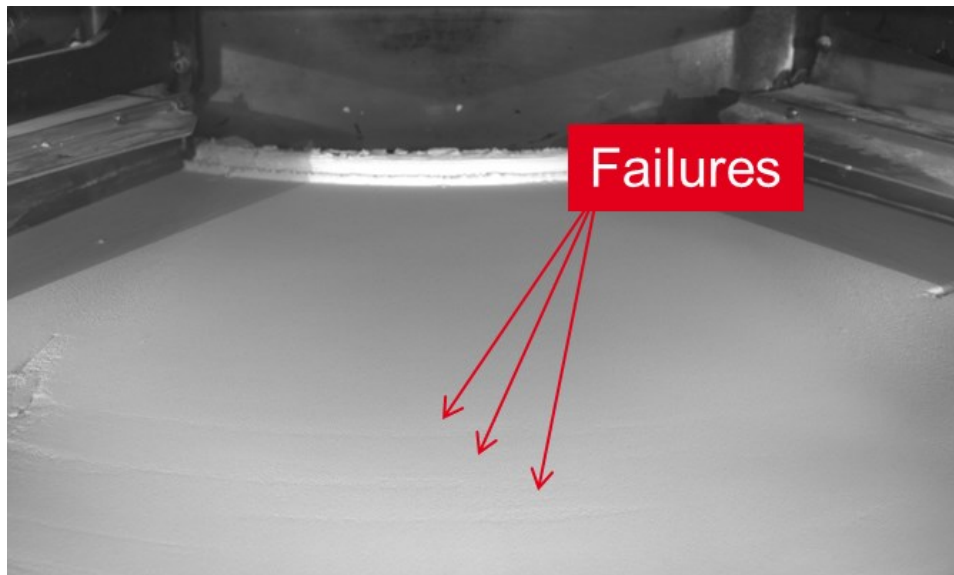
Software Engine

IIP für die Qualitätskontrolle

■ Herausforderungen

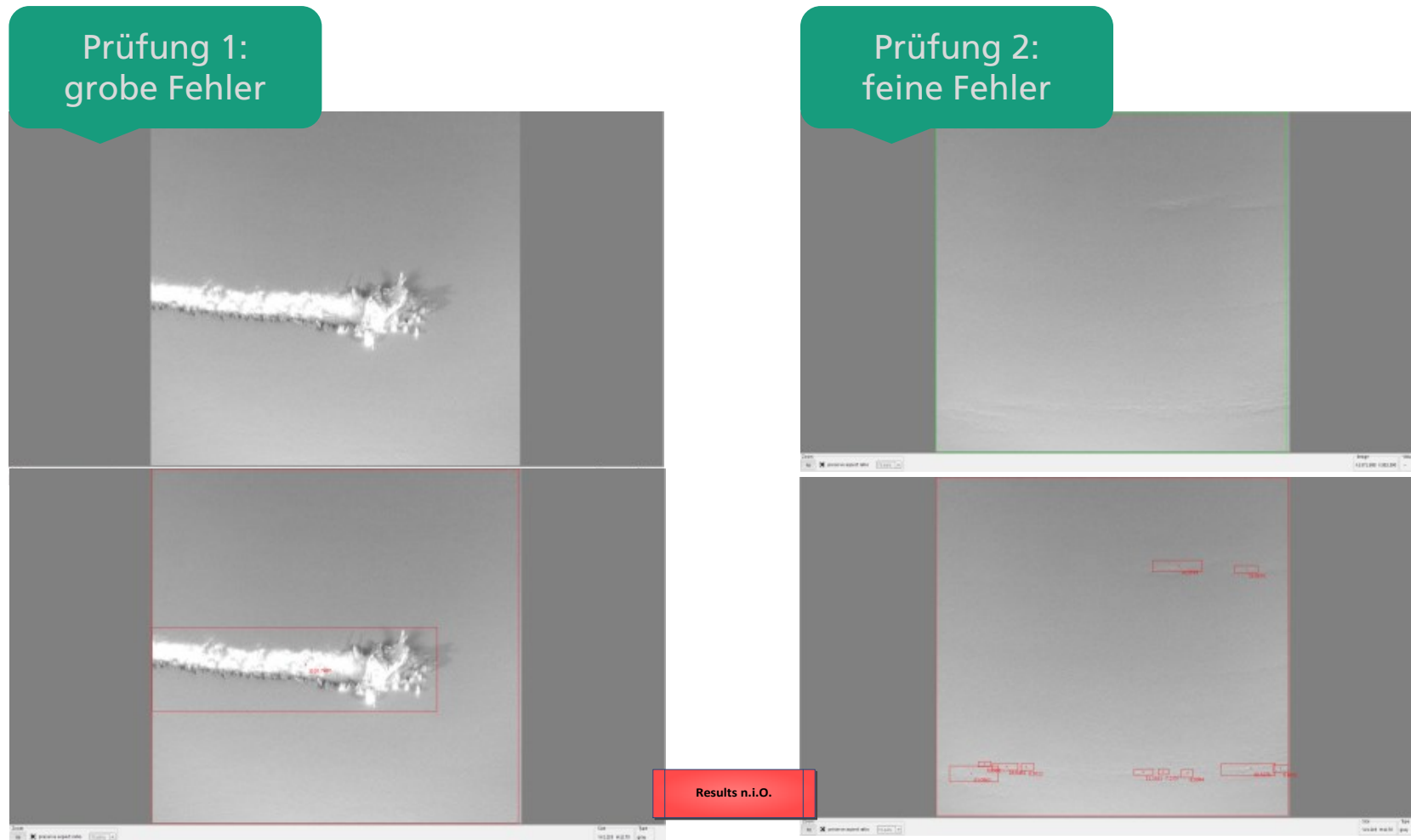
- schwacher Bildkontrast
- breites Fehlerspektrum

⇔ die zweite Hauptroutine: „IIP for Quality Control“



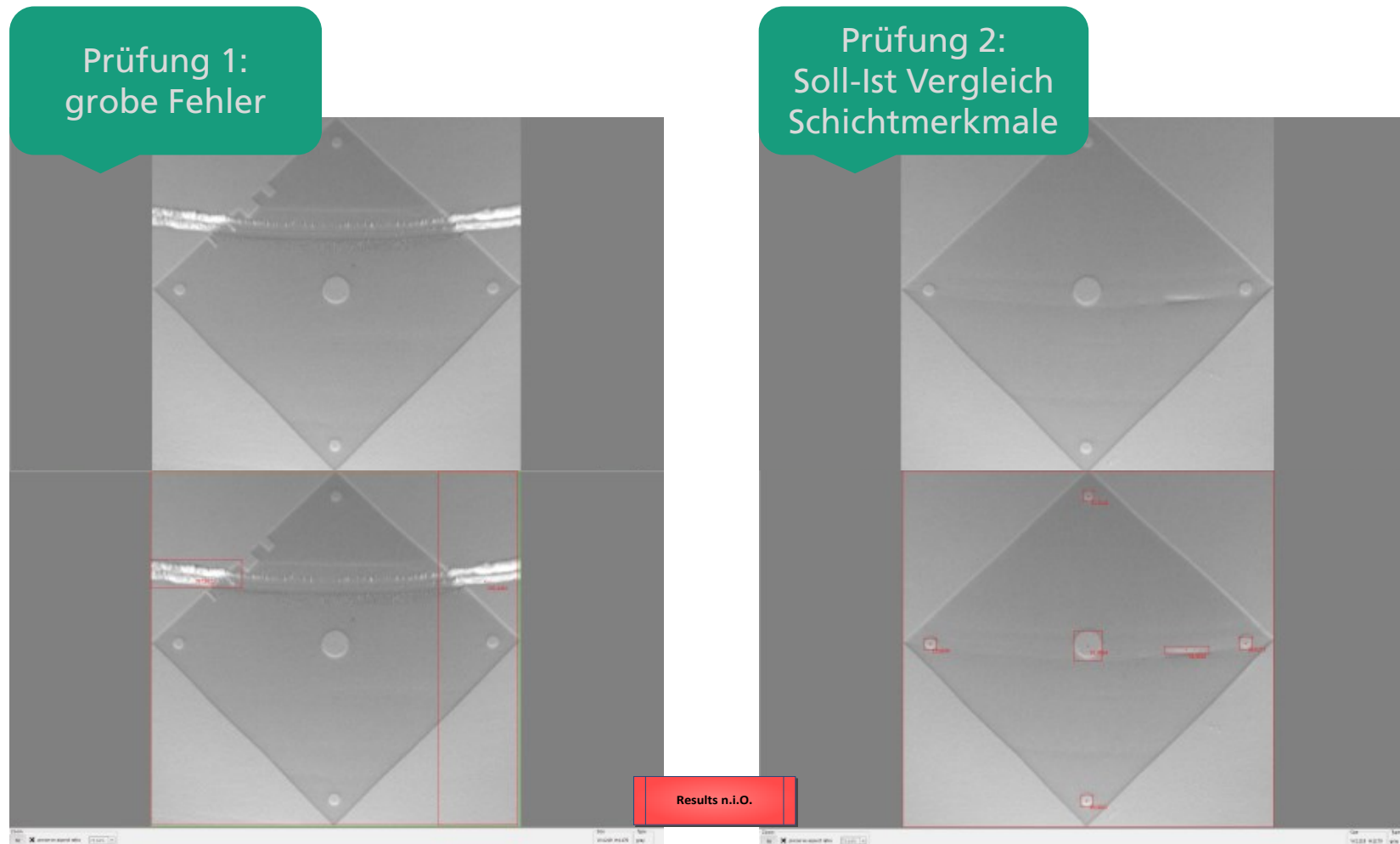
IIP für die Qualitätskontrolle

Subroutine: Pulverschichtprüfung



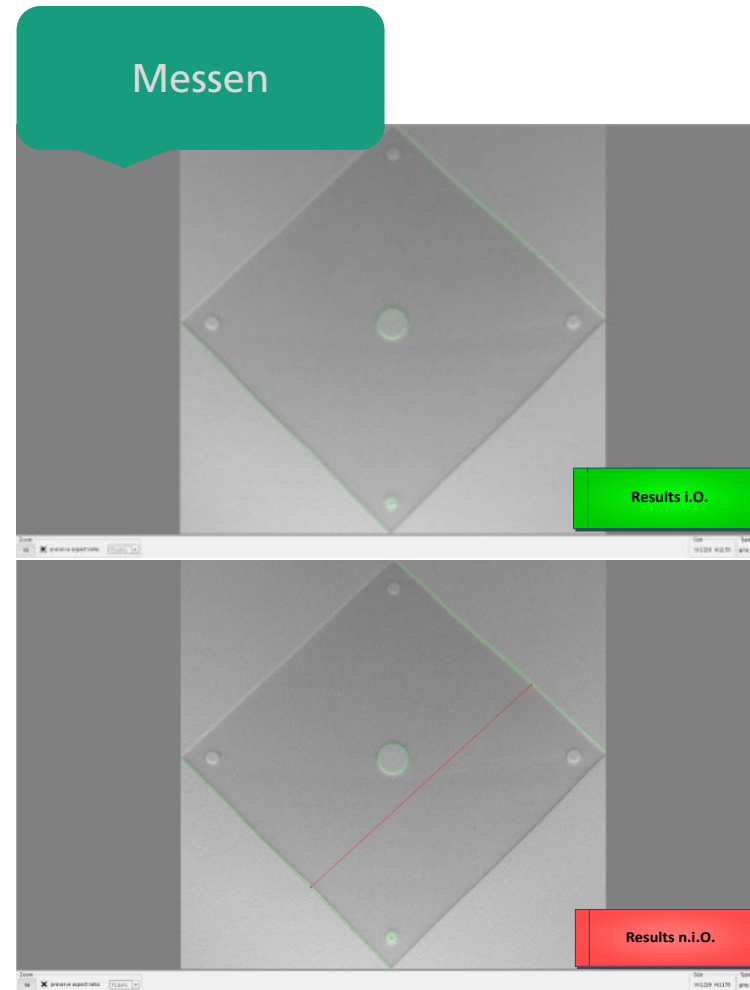
IIP für die Qualitätskontrolle

Subroutine: gesinterte Pulverschichtprüfung

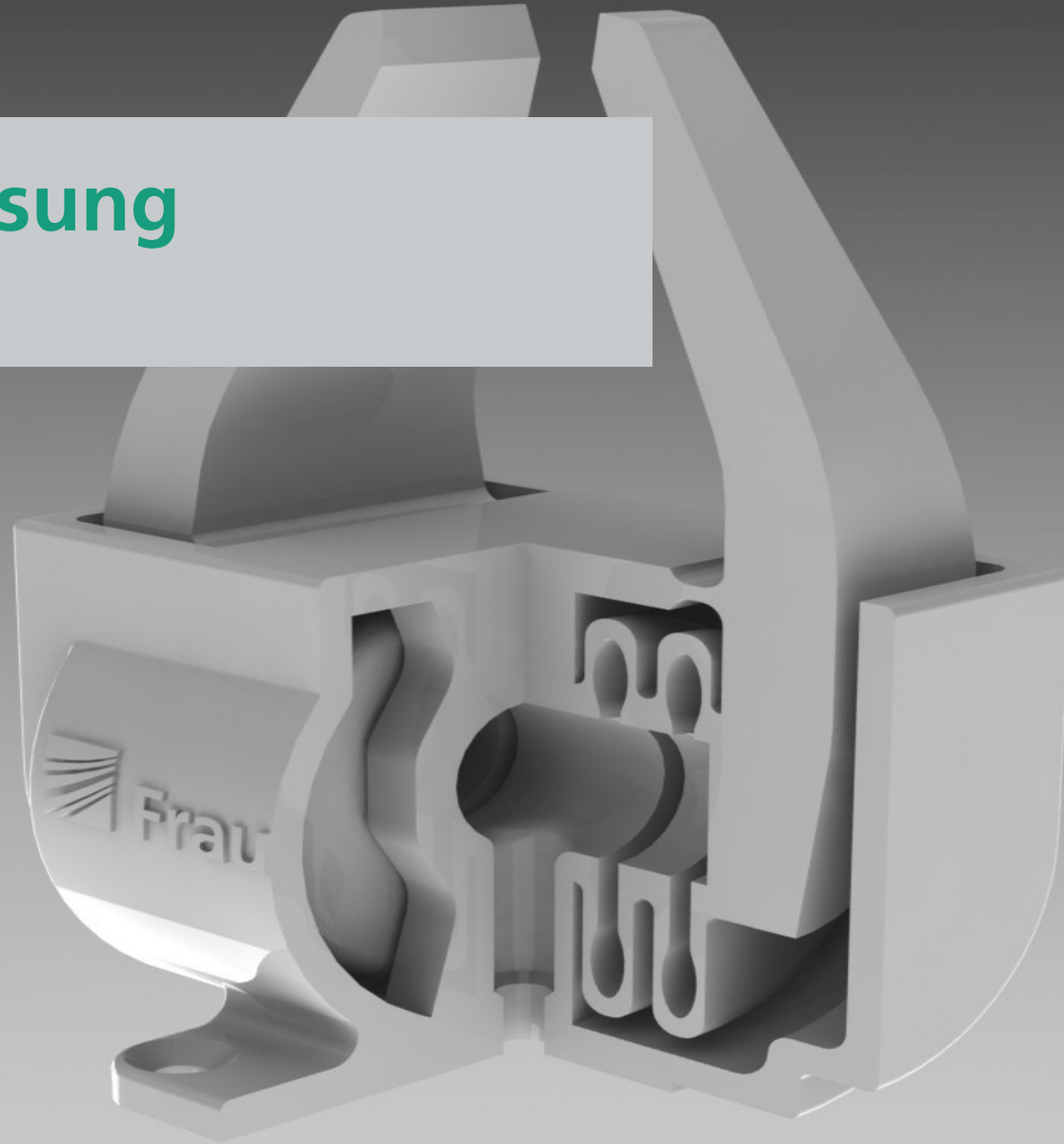


IIP für die Qualitätskontrolle

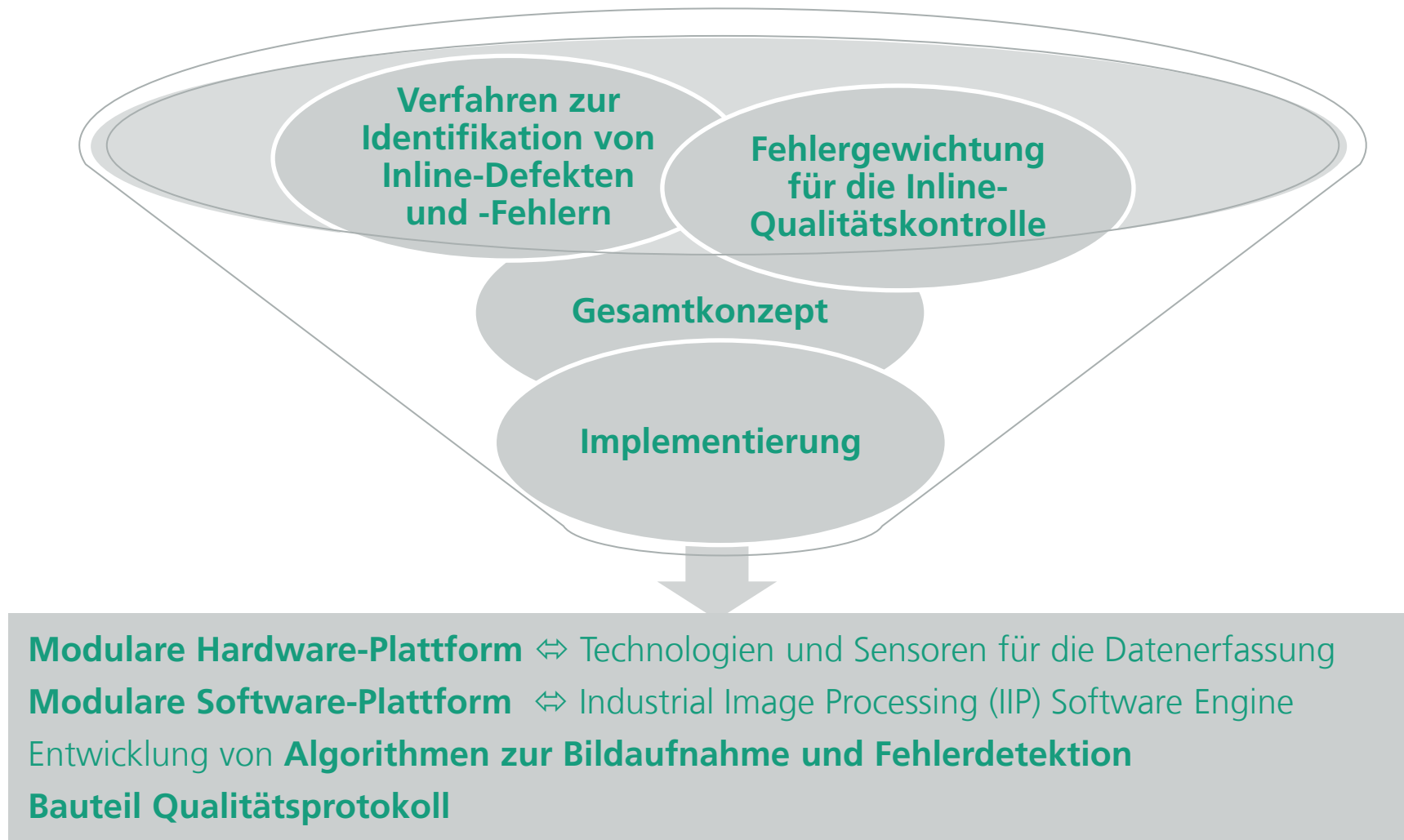
Subroutine: Prüfung von gesinterten Pulverschichtlagen



Zusammenfassung



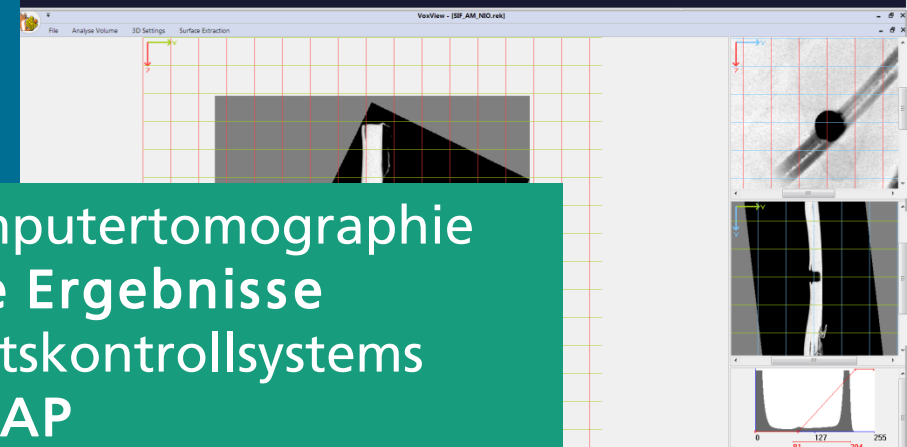
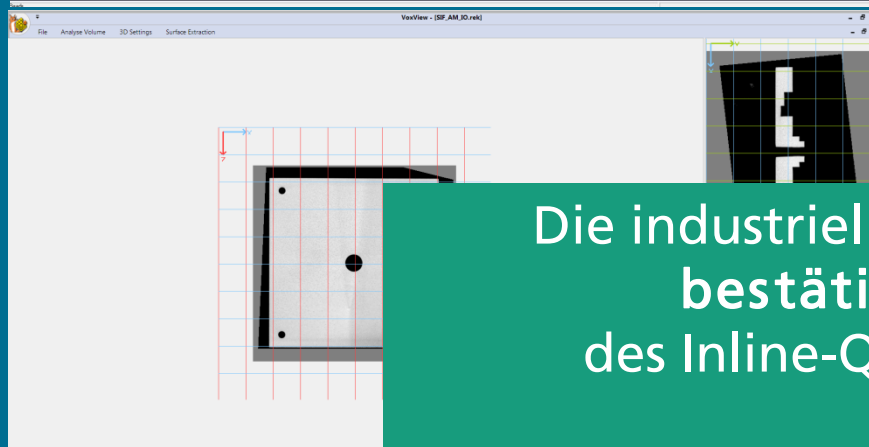
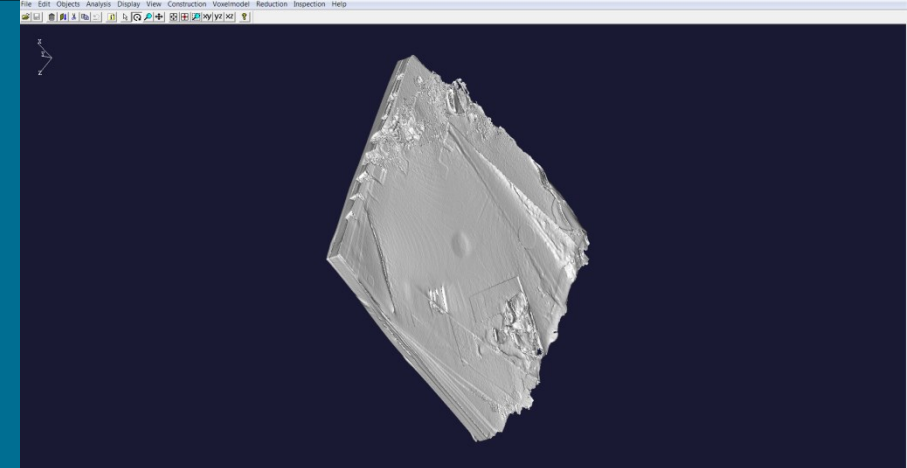
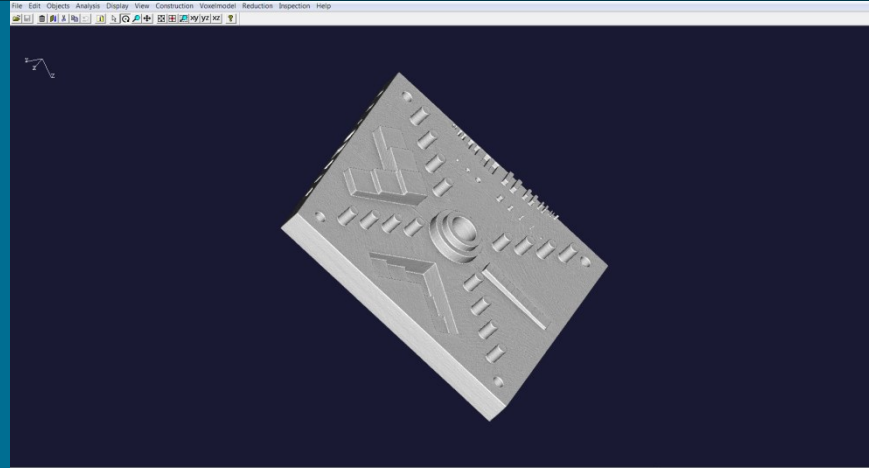
Inline-Qualitätskontrolle für pulverbasierte Verfahren



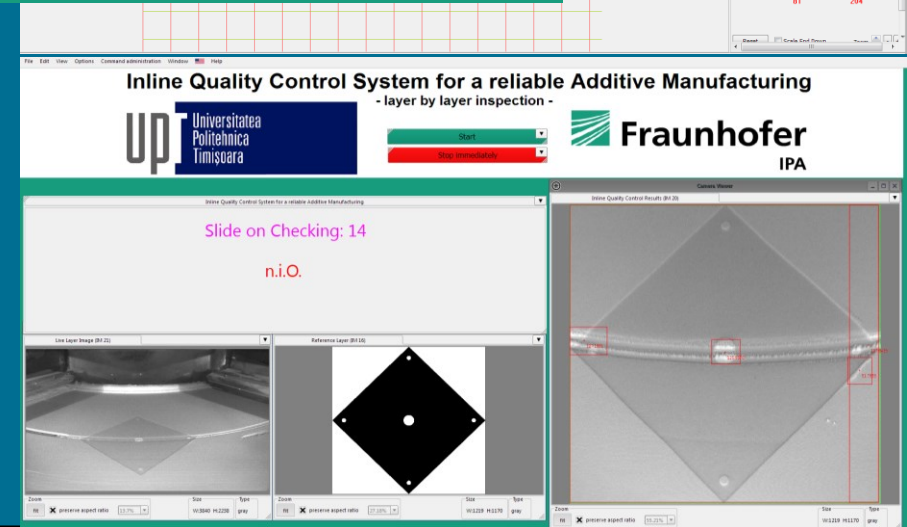
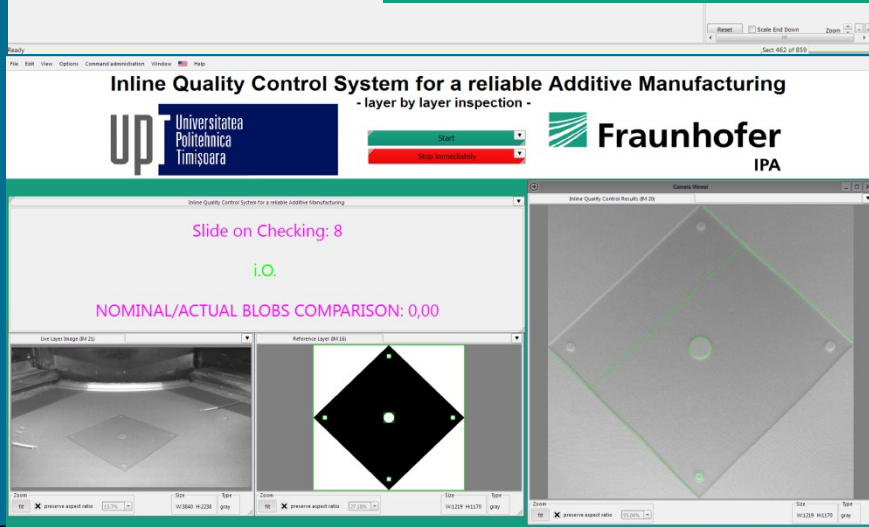
Inline-Qualitätskontrolle für pulverbasierte Verfahren



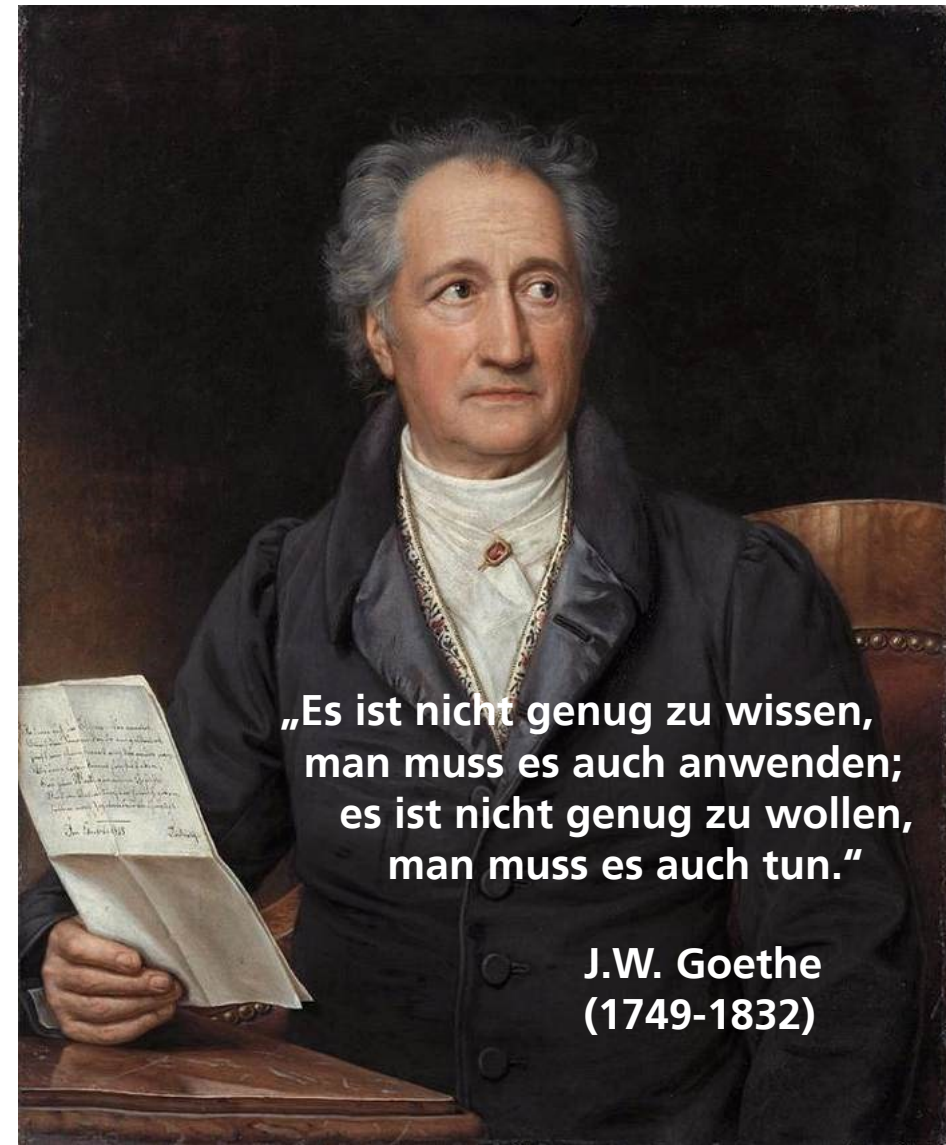
Quelle: Simina Fulga; Fraunhofer IPA



Die industrielle Computertomographie
bestätigt die Ergebnisse
des Inline-Qualitätskontrollsystems
IQ4AP



Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!



**„Es ist nicht genug zu wissen,
man muss es auch anwenden;
es ist nicht genug zu wollen,
man muss es auch tun.“**

**J.W. Goethe
(1749-1832)**

Qualität 4.0 für die additive Fertigung

Ihr Ansprechpartner



Simina Fulga
Projektleitung Rumänien |
Bild- und Signalverarbeitung

Phone +49 711 970-1856
Simina.Fulga@ipa.fraunhofer.de

Wir produzieren Zukunft
Nachhaltig. Personalisiert. Smart.

Sie bleiben wettbewerbsfähig
Nachhaltig. Flexibel. Wirtschaftlich.

www.ipa.fraunhofer.de
www.wir-produzieren-zukunft.de

Literaturangaben

- [1] S. Fulga, A. Davidescu and I. Effenberger, "Identification of in-line defects and failures during Additive Manufacturing Powder Bed Fusion processes", MATEC Web Conf. 94 (2017) 03005.
- [2] S. Fulga, A. Davidescu and I. Effenberger, "Conceptual approach for an in-line quality control system in Additive Manufacturing Powder Bed Fusion processes", MATEC Web Conf. 94 (2017) 03006.
- [3] S. Fulga, A. Davidescu, I. Effenberger and A. Verl, "Tasks for in-line quality control and in-situ optimisation of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes (Professional)", in: Proc. of the 6th International Conference on Additive Technologies, Rapid Prototyping and Innovative Manufacturing Network - RAPIMAN-,Nürnberg,2016, pp. 285-291.
- [4] S. Fulga, A. Davidescu, I. Effenberger and A. Verl, In-line quality control system for a reliable Additive Manufacturing -layer by layer inspection-, in: Proc. of the 6th International Conference on Additive Technologies, Rapid Prototyping and Innovative Manufacturing Network -RAPIMAN-, Nürnberg, 2016, pp. 292-299.