

# NDT 4.0 Anforderungen, Möglichkeiten und Realisierung in der PT/MT-Prüftechnik

Rainer LINK<sup>1</sup>, Nathanael RIESS<sup>2</sup>, Reinhard PAWELLETZ<sup>2</sup>, Michael LORENZEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unternehmensberatung Dr. Rainer Link, Kerpen

<sup>2</sup> Helling GmbH, Heidgraben

Kontakt E-Mail: rainer.link@gmx.info

**Kurzfassung.** Industrie 4.0 und in Folge NDT 4.0 beruhen auf der Integration digitaler, Internet und Cloud Systeme in Produktion und Prüfung.

Hieraus ergeben sich die folgenden Möglichkeiten für Prüfgeräte, die am Beispiel der MT/PT Prüfung realisiert wurden.

a) Die Prüfung erfolgt durch einen Prüfer, der mittels digital vorliegender Prüfanweisung durch die rechnergesteuerten Einstellungen geführt wird, wobei die Prüfparametereinstellungen durch den Prüfer aktiviert werden. Die Markierung, Vermessung, Bewertung, Darstellung und Dokumentation erfolgt durch den Prüfer auf einem Computersystem u. U. mit Bildverarbeitungssystem. Dabei sind Vermessungen und Verarbeitungen immer getrennt auf einer Kopie der ursprünglichen Anzeige zu erfolgen. Sämtliche digital vorhandenen Informationen können allen interessierten Parteien entsprechend zur Verfügung gestellt werden. Ein wesentlicher Aspekt ist der direkte Kontakt mit der Produktion, Konstruktion und u. U. der Materialbeschaffung. Die digitale Dokumentation sorgt auch für einen späteren Nachweis einer korrekten Prüfung!

b) Die Prüfung erfolgt automatisiert. Dabei werden alle Schritte der Prüfung wie in a) durch das Handhabungs- und Rechnersystem inklusive Bildverarbeitung gesteuert, kontrolliert und ausgewertet. KI, Machine Learning oder Neuronale Netzwerke könnten, falls erforderlich und allgemein zugänglich, mit dem notwendigen Datensatz bei komplexen Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden. Die automatisierte Auswertung hat den Vorteil, dass der Prüfungsvorgang nicht vom physiologisch-psychologischen Zustand des Prüfers beeinflusst wird. Das Ergebnis durch einen Prüfer hängt nachweisbar von den Umgebungsbedingungen ab, oder falls nur wenige Anzeigen zu beobachten sind.

In diesem Vortrag berichten wir über den Stand der Technik, über Fortschritte sowie unsere positiven/negativen Erfahrungen bei PT/MT Prüfungen, Prüfsystemen und Prüfobjekten.

## Einleitung

Bereits 2011 wurde auf der Hannover Messe der Begriff Industrie 4.0 zur Förderung Kleiner und Mittelgroßer Unternehmen (KMU) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung eingeführt. Mit großer finanzieller Unterstützung sollten die KMU in ihrer innovativen Kompetenz und ihrer Teilnahme an technischen Programmen zu Forschung und Entwicklung (R&D) gefördert werden. Als Ergebnis sollte die Integration in die „Smarte Fabrik“ innerhalb der 4. Industriellen Revolution auch für KMU sichergestellt sein.



Sie beruht auf der Integration Digitaler-, Internet- und Cloud-Systeme in Produktion und Qualitätssicherung. Die DGZfP hat diese Herausforderung für die zerstörungsfreien Prüfbereiche frühzeitig erkannt und in der Gründung des DGZfP Fachausschusses „ZfP 4.0“ darauf reagiert.

Die „Smarte Fabrik“ ist keine Utopie. So hat die Fa. Mercedes bereits im Mai 2018 die Factory 56 in Sindelfingen unter Einschluss der Anforderungen der Industrie 4.0 begonnen aufzubauen, die 2021 bereits in Betrieb ging. Für die gleiche Produktionsanlage wurde 2020 in Ungarn der Grundstein gelegt, Betriebsbeginn soll bereits 2024 sei. In beiden Produktionsanlagen sollen die Kfz Premium Klasse und selbstfahrende Taxis hergestellt werden.

Siemens hat eine Produktionsanlage in Bamberg seit 2015 in Betrieb. Hier werden Siemens-Steuerungen gefertigt. Es ist ein Vorzeigewerk für Industrie 4.0. Als zerstörungsfreie Prüfung wird die Durchstrahlungsprüfung automatisiert eingesetzt im Wesentlichen zur Überprüfung der Vollständigkeit und Verkabelung der integrierten Schaltungen.

### **Produktion in der „Smarten Fabrik“**

In der folgenden Abbildung (Abb.1) ist eine schematische Darstellung der Produktions-Zusammenhänge in einer Smart Factory gezeigt. Sie umfassen vom Eingang des Rohmaterials über die Bearbeitung, Prüfung, Montage bis zur Lieferung und ggfls. den Betrieb mit eingebautem Sensor zur Überwachung des späteren betrieblichen Zustands, Structural Health Monitoring (SHM) alle Prozessschritte. Sämtliche digitalen Informationen in den diversen Produktionsschritten können an die interessierten Bereiche und Datenspeicherungen über entsprechende Schnittstellen übertragen werden.

(Nebenbei: die DGZfP hat auch innerhalb des FA ZfP 4.0 einen Unterausschuss Schnittstellen gegründet, um deren Bedeutung gerecht zu werden.)

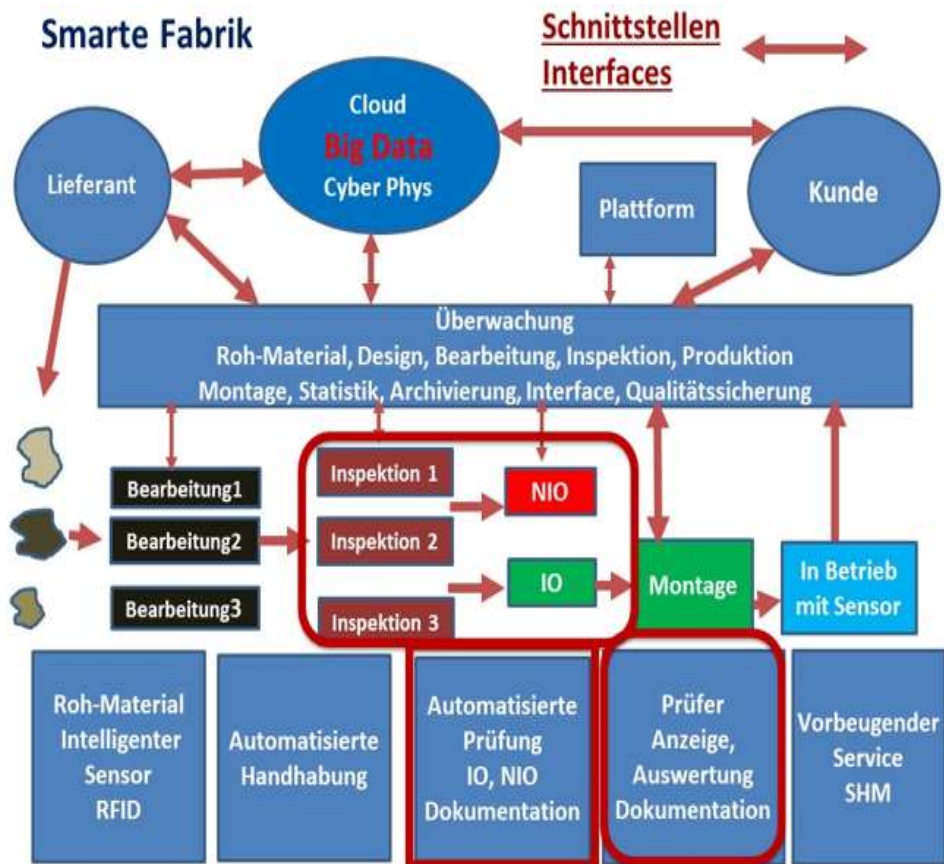


Abb. 1: Schematische Darstellung der Zusammenhänge in einer Smart Factory

In diesem Artikel sollen wie in Abb. 1 dargestellt die Bereiche der Inspektion mittels zerstörungsfreier Prüfung (rot umrandete Bereiche), aufgeteilt einmal unter Einbeziehung eines Prüfers, zum anderen basierend auf einer automatisierten Prüfung beschrieben werden.

### Inspektion durch einen Prüfer

Die prinzipiellen Schritte sind der nächsten Abb.2 dargestellt.

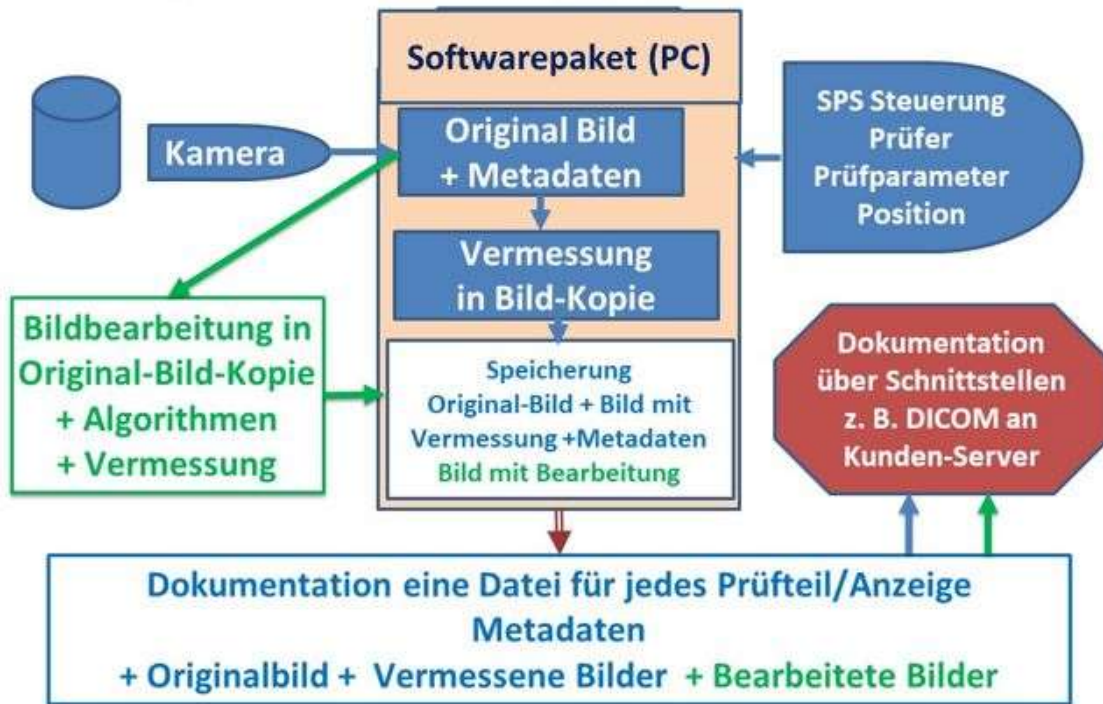


Abb.2: Prinzipielle Schritte bei der Auswertung mit Prüfer, ggfls. unter Verwendung der mit einer Bildverarbeitungssoftware (BV) behandelten digitalisierten Anzeigen.

In diesem Kapitel soll die Beurteilung und Auswertung durch einen Prüfer beschrieben werden, der mittels digital vorliegender Prüfanweisung durch die rechnergesteuerten Einstellungen geführt wird, der Prüfvorgang also nicht automatisiert erfolgt.

Ein Verzicht auf Automatisierung kann notwendig sein durch eine Vielzahl verschiedener zu prüfenden Bauteilen z.B. durch einen Dienstleister oder durch eine schwierig nachzuweisende Fehleranzeige. In vielen Bereichen ist der Mensch immer noch im Vorteil bei der Detektion und Beurteilung. Die Einbeziehung der NDT 4.0 auch in diesem digitalisiertem Prüfvorgang bietet wesentliche Vorteile, die sich aus der Abb. 1 ergeben.

Diese sind:

- Absicherung der Prüfung und Ergebnisse bei späteren Garantie oder Produkthaftungsfällen insbesondere in der Europäischen Union, also eindeutige Archivierung. Als Beispiel muss hier der Unfall durch Bruch einer Achse eines Güterwagens in Viareggio genannt werden. Bei der Explosion des Tankwagens sind 32 Menschen gestorben. Die Suche nach den Schuldigen landete letztendlich bei angeblichem Versagen der Wiederholungsprüfung, dem Prüfer.



Abb.3: Das Feuer in Viareggio  
<https://www.flickr.com/people/39486454@N00>

- Digitale Vernetzung mit den interessierten Parteien, z. B. direkt mit der Produktion, die spontan reagieren kann.
- Steuerung des gesamten Prüfvorganges durch digitale Einblendung der Prüfanweisung.
- Erstellen des digitalen Prüfberichts.
- Online Auswertung der Anzeigen an Prüfer der Stufe 2 oder 3 zur Kontrolle oder weiteren Bearbeitung.
- Datenspeicherung (Storage and Retrieval) des gesamten Prüfablaufs, der Anzeigen und Beurteilung.

Da die Anzeigen in der PT und MT Prüfung in der Regel linear sind, reicht es für eine manuelle Bewertung in der Regel aus, eine Längenvermessung durchzuführen. Dies ist am Beispiel Abb.4 einer MT Prüfung eines Radsatzes an einer Eisenbahnachse dargestellt.

Hierzu wurde das von der Helling GmbH entwickelte Auswerte und Messsystem HCC benutzt, das auch Bildverarbeitungssysteme, hier das iSee der BAM, Berlin, einbinden kann, womit sich noch weitere Auswertekriterien anbieten, so dass sich die Anzeigen deutlicher hervorheben.

Die Software HCC beinhaltet die Steuerung des Prüfprozesses, die eine Vermessung ermöglicht, eine Prüfanweisung enthält und einen Prüfbericht spezifiziert vorsieht und Längenvermessungen mit und ohne zusätzliche Bildverarbeitung erlaubt. Dabei sind Vermessungen und Bildverarbeitungen immer auf einer Kopie der Original Anzeige zu erfolgen, die auch alle getrennt zu speichern sind.

## Helling HCC Rissmarkierung Lauffläche Radsatz

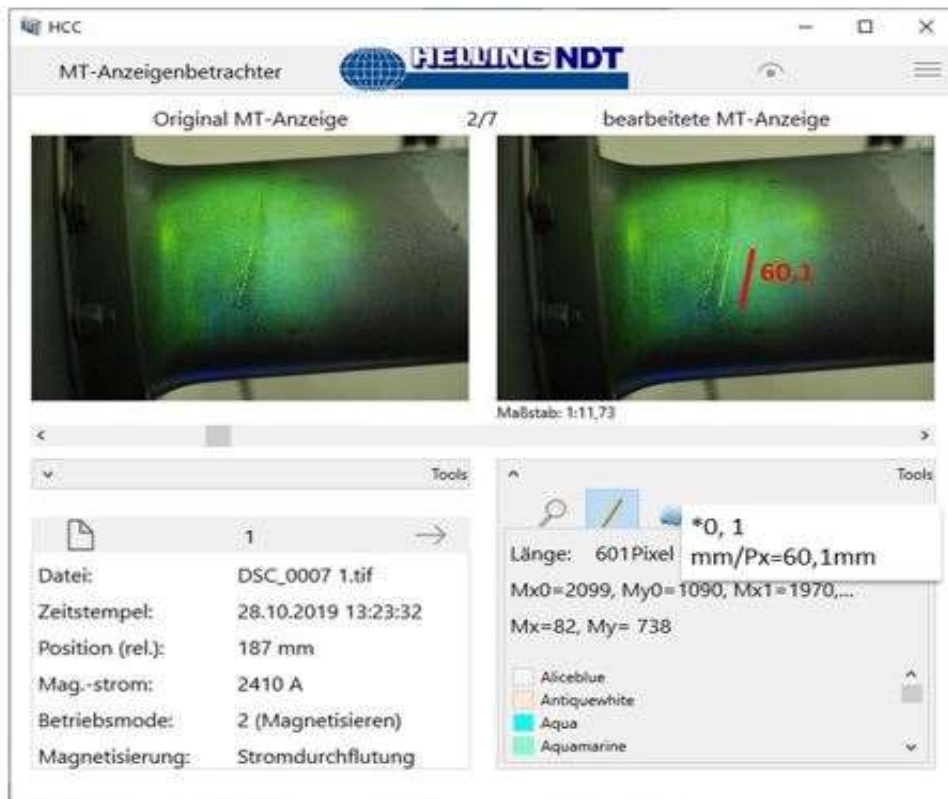
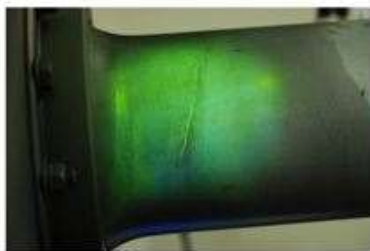


Abb.4: Rissmarkierung auf der Lauffläche eines Eisenbahnwadsatz mit dem HCC. Es sind drei lineare Anzeigen zu erkennen, eine davon recht schwierig. Die längste wurde vermessen und hat eine Länge von 60,1 mm.

Auch ohne vollautomatische Auswertung und Entscheidung iO/niO kann ein Prüfer ein Bildverarbeitungssystem für die Auswertung benutzen. Wir haben in diesem Fall das Bildverarbeitungssystem, iSee, der Bundesanstalt für Materialforschung und –Prüfung, BAM, eingesetzt (Abb.5). Dabei ergaben sich für die nun leichter erkennbaren „Risse“ die Längen von ca. 14 mm, 60 mm und 13 mm. K ist die Kalibrierungslänge von 202 mm (der Abstand zwischen der oberen und unteren geometrischen Anzeige). In diesem Beispiel wurden als Bildverarbeitungsschritte einfache arithmetische Subtraktionen, sowie Fourier- und Besselfilter eingesetzt. Neben dem Originalbild sind für die Auswertung genutzte Bildverarbeitungsroutinen natürlich auch im Prüfprotokoll zu vermerken. Allzu leicht können auch Anzeigen bei zu leichtfertigem Gebrauch verschwinden.



**HCC-ip**  
**Messung, manuell der Risslänge**  
**nach BV (BAM) und Freistellung,**  
**deutlichere Anzeige**

Label	Length
1 DSC_0007 1.tif	1.43E1
2 DSC_0007 1.tif	5.95E1
3 DSC_0007 1.tif	1.25E1
K DSC_0007 1.tif	2.02E2

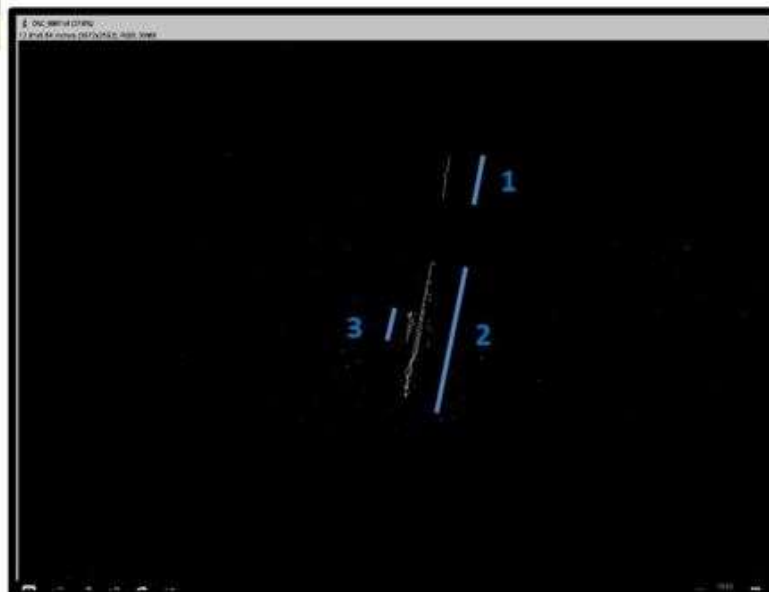


Abb.5: HCC Vermessung der Risslängen nach Bildverarbeitung

## Automatisierte Prüfung

Im folgenden Kapitel soll eine automatisierte Bildauswertung, –Entscheidung in iO/niO beschrieben werden. Dabei werden alle Schritte der Prüfung durch das Handhabungs- und Rechnersystem inklusive Bildverarbeitung gesteuert, kontrolliert und ausgewertet.

Künstliche Intelligenz, KI, oder neuronale Netzwerke könnten, falls erforderlich und zugänglich, mit dem notwendigen Datensatz bei komplexen Entscheidungen integriert werden. Komplizierte Entscheidungsmerkmale im Gegensatz zu komplexen können durch Algorithmen gelöst werden.

Nun ist es nicht so, dass automatisierte Systeme in der PT/MT Prüfung erst mit der Einführung der Industrie 4.0/ZfP 4.0 entwickelt wurden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wurden automatisierte Systeme bereits vor Jahrzehnten in der PT/MT Prüfung entwickelt und erfolgreich eingesetzt:

Karl Deutsch GmbH 1981

K+D Flux-Technik GmbH 2008

Dr. Sauerwein Isotopenforschung GmbH 1989.

Aus eigener Erfahrung und vollständiger Dokumentation in der Zeitschrift Materialprüfung soll letzteres als Beispiel dienen (Abb.6).

---

# MATERIAL PRÜFUNG MATERIALS TESTING

---

31. Jahrgang 1989 / 4

Carl Hanser Verlag, München

---

*H. P. Busse, R. Grimm, R. Link, W. Nuding, C. Stapf, G. Streckenbach, H. Wisacker,  
W. Zindler, Haan, und K. Disselhorst, H. Burghoff, R. Schulz, E. Stolzenberg, Wülfrath*

## Automatisches Erkennen von Oberflächenrissen bei der Magnetpulverprüfung



Abb. 6: Automatisierte Schwenklagerprüfung mittels MT

Das zu prüfende Objekt war ein Schwenklager für ein Kfz des Herstellers Ford in dessen Werk in Wülfrath, NRW, das nach der Bearbeitung zum 2. mal einer MT Prüfung unterzogen werden musste. Insgesamt wurden 3 Anlagen gebaut, die im Produktionsprozess mehr als 1 Million Teile bewerteten.

Ein wesentlicher Grund für die Automatisierung war die Belastung der Prüfer im 3-Schicht Betrieb. Die Zahl der nach der Bearbeitung noch vorhandenen „Rissanzeigen“ war sehr gering, was eine negative Auswirkung auf die Aufmerksamkeit der Prüfer ergab. Eine automatisierte Prüfung durch ein Handhabungssystem für den Prüfablauf und ein Rechnersystem für die Auswertung lassen sich hierdurch nicht beeinflussen. Hinzu kommt

bei einem 24h Einsatz die Einsparung trotz erhöhter Investitionskosten gegenüber den Personalkosten im 3-Schicht Betrieb.

Die automatisierte Prüfung hat eben den Vorteil, dass der Prüfungsvorgang nicht vom physiologisch-psychologischen Zustand des Prüfers beeinflusst wird. Das Ergebnis durch einen Prüfer hängt auch nachweisbar von den Umgebungsbedingungen ab, Beleuchtung, Temperatur, ggfls. UV Licht. Der schematische Aufbau der Prüfanlagen ist in der folgenden Abbildung (Abb.7) dargestellt.

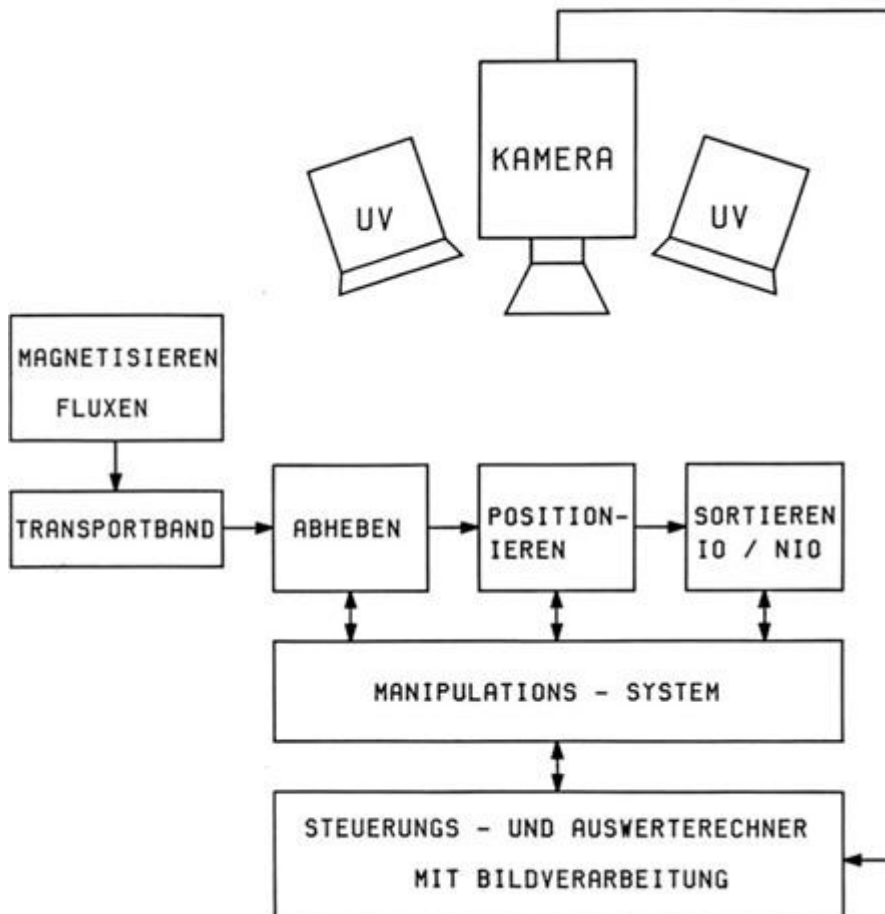


Abb.7: Graphische Darstellung der automatisierten Prüfanlage (aus der Originalarbeit „Materialprüfung 1989/4“, siehe Abbildung oben).

Die Bildverarbeitungsschritte in der automatisierten MT Prüfanlage sind im Folgenden dargestellt (Abb.8. entspricht Bild 3 aus der Originalarbeit).



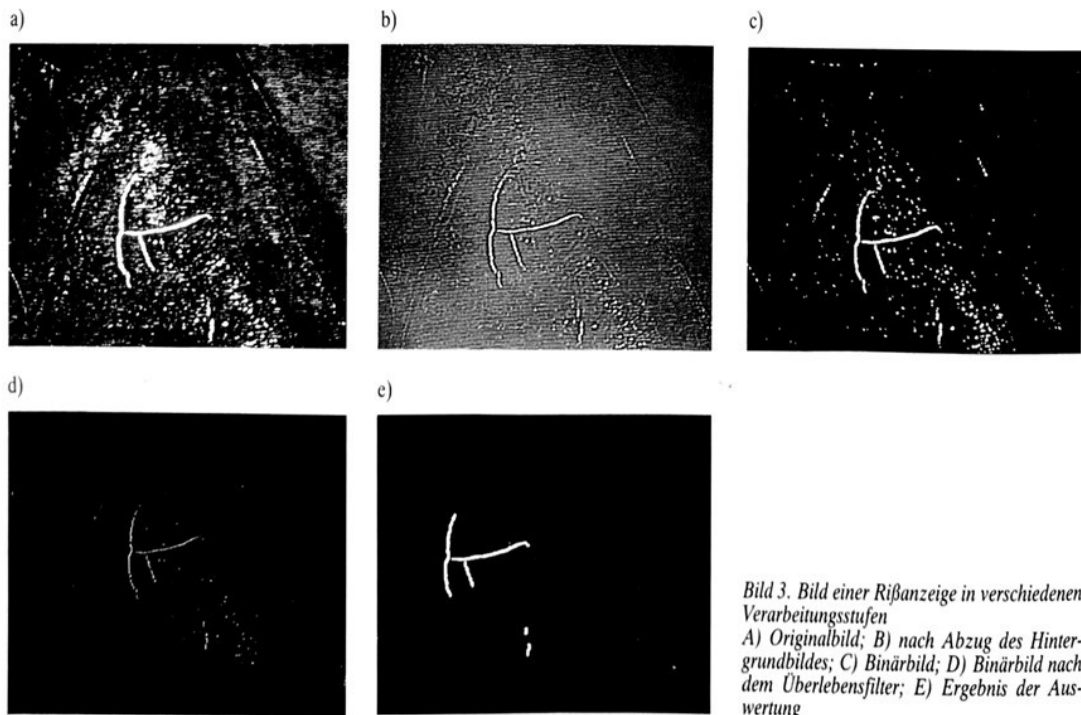


Bild 3. Bild einer Rißanzeige in verschiedenen Verarbeitungsstufen  
 A) Originalbild; B) nach Abzug des Hintergrundbildes; C) Binärbild; D) Binärbild nach dem Überlebensfilter; E) Ergebnis der Auswertung

Abb.8: Bildverarbeitungsschritte in der automatisierten MT Prüfung der Schwenklager

Die Ablaufzeiten des automatisierten Prüfsystems sind im Folgenden gelistet.

<u>Bildverarbeitung</u>	
Bildeinzug	0,32 s
Hintergrundbild + Subtraktion	1,0 s
Berechnung Histogramm	0,16 s
Dynamische Schwelle	0,16 s
Überlebensfilter	0,38 s
Fehlerkoordinaten	0,08 s
<u>Bildauswertung</u>	
Fehleranalyse	0,5 bis 5,0 s

Entscheidende Vorgaben dabei waren die Detektion einer Rissmindestlänge von 2 mm, und eine Entscheidung innerhalb von max. 16 sec. Ganz wesentlich war die Herausforderung, die Zahl der Pseudofehler unter 2% zu halten.

Besonders zu beachten ist im Hinblick auf die Produkthaftung natürlich, dass der Nachweis einer Anzeige kein Nachweis ist, dass andere „Risse“ nicht übersehen wurden.

Deshalb wurden in jeder der 3-Prüfschichten bekannte fehlerhafte Teile in den Prüfprozess eingeschoben, um die Funktionsfähigkeit der Anlagen zu überprüfen. Dabei stellte sich heraus, dass zwei wesentliche Einflussgrößen die Auswertung beeinflussten. Zum einen die Überprüfung einer korrekten Einstellung der Magnetfeldstärke während der Magnetisierung des Bauteils und der Konsistenz des Prüfmittels, zum anderen die Reinigung der Kameralinsen von den durch das schnelle Handhabungssystem verunreinigten Prüfmittelspritzer. Der Nachweis einer einwandfreien Prüfung in der MT Prüfung lässt sich jedoch auch durch Anbringen von Kontrollkörpern z.B. Burmah-Castrol auf dem Bauteil vor jedem Schichtwechsel realisieren.

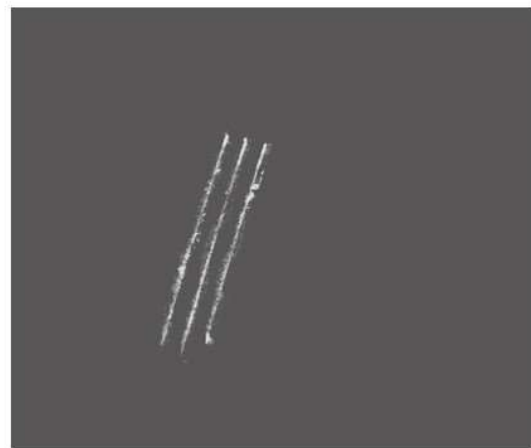
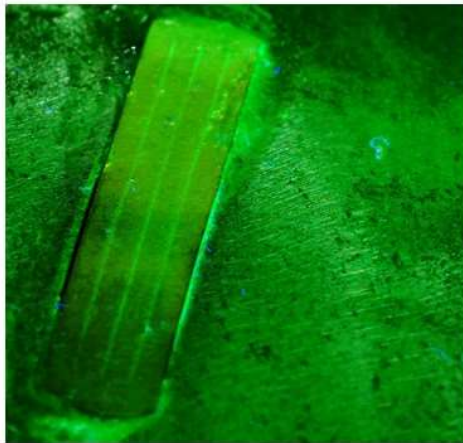


Abb.9: Burmah-Castrol Prüfkörper

Für die Freistellung der Anzeigen wurden die gleichen Bildverarbeitungsroutinen wie in Abb.8 angewandt. Sie ist auch hier die Basis für eine automatisierte Bewertung.

## SWOT ANALYSE

Im abschließenden Kapitel soll in einer - sicher nicht vollständigen - „SWOT Analyse“ (Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats) die Einführung der ZfP 4.0 in einem KMU aufgelistet werden.

## SWOT Analyse Nicht vollständig!

Stärken:	Schwächen:	Möglichkeiten:	Bedrohungen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitalisierte Information</li> <li>• Einfache Beteiligung aller Parteien</li> <li>• Daten Analyse</li> </ul> <p>Horizontaler und Vertikaler Austausch von Daten durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Internet</li> <li>• Cloud , Big Data Berechnungen</li> <li>• Plattformen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mensch-Maschine Relation</li> <li>• Standardisierung der Schnittstellen</li> <li>• Verfügbares Personal mit entsprechender Ausbildung</li> <li>• Mangel an Unterstützung für KMU</li> <li>• Kosten für Personal und Investitionen für Ausrüstung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Produktion</li> <li>• Digitale Schnittstellen zwischen allen Prozessen</li> <li>• Vollständig automatisierte ZfP Anlagen</li> <li>• Echt Zeit Analyse von Entwicklung, Produktion, Inspektion</li> <li>• Neue Geschäftsfelder SHM</li> <li>• Neue Training und Ausbildung</li> <li>• Einsatz KI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akzeptanz durch Mitarbeiter</li> <li>• Verlust des Know How durch Cloud Verbindungen</li> <li>• Mangel an qualifiziertem Personal</li> <li>• Hacker Attacken</li> <li>• Akzeptanz durch die Gesellschaft</li> </ul>

Die aufgeführten Positionen sind mehr oder weniger selbsterklärend. Es sind insbesondere die Bedrohungen, die die Verantwortlichen Manager einer KMU zögern lassen, ZfP 4.0 durchgängig und zum derzeitigen Zeitpunkt einzuführen.

Hinzu kommt, dass eine automatisierte Prüfanlage für die meisten Komponenten eine Anpassung der Prüfsoftware erforderlich macht. Die Kosten für die Entwicklung und die Klärung des „Know-How-Besitzes“ sind oft zwischen Kunden und Herstellern der Anlagen nicht kompatibel.

Auf der anderen Seite sollte man sich darüber im Klaren sein:

Was auch immer gedacht wird

- Falls es physikalisch möglich ist
- Falls es Sinn macht

Wird es realisiert!!!

Und dies gilt auch für ZfP 4.0!!

Addendum:

(Manchmal wird es realisiert, auch wenn es keinen Sinn macht!)