

Prozessintegrierte Überwachung des Flussmittelauftrags

A. Neiser, SEHO Systems GmbH, Kreuzwertheim, Deutschland

U. Wittreich, Foundational Technologies SIEMENS AG, Berlin, Deutschland

Der Flussmittelauftrag stellt eine zentrale Voraussetzung für das fehlerfreie Wellen- oder Selektivlöten dar. Flussmittel entfernt Oxidschichten von den zu benetzenden Metalloberflächen und verhindert deren erneute Oxidation. Erst dadurch wird eine ausreichende Benetzung ermöglicht und die Grundlage für eine metallurgisch einwandfreie Lötverbindung geschaffen.

Entscheidend für die Lötqualität ist dabei nicht nur die chemische Wirksamkeit des Flussmittels, sondern vor allem auch dessen exakte Dosierung und präzise Positionierung auf der Leiterplatte. Eine Unterdosierung kann zu typischen Lötfehlern wie unvollständigem Durchstieg oder kalten Lötstellen führen. Eine Überdosierung erhöht hingegen das Risiko von Flussmittelrückständen, die die Funktionalität und Langzeitzuverlässigkeit der Baugruppe beeinträchtigen können.

1 Einleitung

Im Rahmen eines SEHO-SIEMENS-Technologietages wurde die Überprüfung des Flussmittelauftrags in einem Expertentreffen als dringendes Handlungsfeld identifiziert.

Aktuelle Überwachungskonzepte basieren überwiegend auf stichprobenartigen Prüfungen, beispielsweise durch den Einsatz von Testbaugruppen, oder auf einer reinen Funktionsüberwachung der Fluxerdüsen. Diese Verfahren sind jedoch nicht prozessintegriert und erlauben keine belastbaren Aussagen über den tatsächlich applizierten Flussmittelauftrag auf der einzelnen Baugruppe.

Typische Fehlerquellen sind unter anderem eingetrocknete Flussmittelreste an Sprühköpfen, Luftblasen im System, Schwankungen in der Flussmittelzusammensetzung sowie Abweichungen der Sprühkopfpositionen von den definierten Sollpositionen, insbesondere bei Mehrkopfsystemen.



Bild 1. Fluxmodul mit mehreren Köpfen.

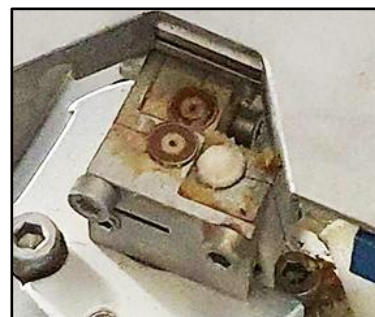


Bild 2. Flussmittelrückstände am Kopf
Auskristallisierung von Feststoffen
durch Undichtigkeit

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen eines SIEMENS-internen Verbundprojekts die Research Group „Electronics Manufacturing“ der SIEMENS AG, Foundational Technologies in Berlin, mit der systematischen Untersuchung möglicher Lösungsansätze beauftragt.

2 Lösungssuche

Ein zentrales Prinzip von SIEMENS Technology Berlin bei der Prozessoptimierung ist die möglichst produktnahe Erfassung qualitätsrelevanter Prozesskenngrößen.

Aus umfangreichen Erfahrungen mit Temperaturprofilaufnahmen und -optimierungen im Wellenlötprozess ist bekannt, dass bei Thermoelementen, die auf der Unterseite von Baugruppen angeordnet sind, während des Flussmittelauftrags ein messbarer Abkühleffekt an den Thermoelementen detektiert werden kann.

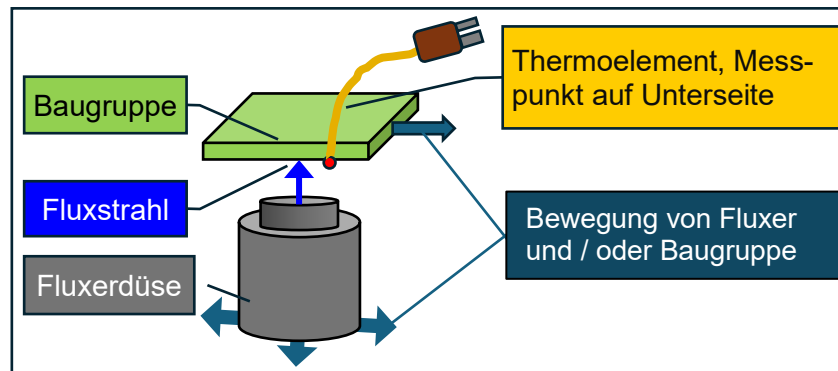


Bild 3. Prinzipskizze Temperaturprofilaufnahme mit Thermoelementen.

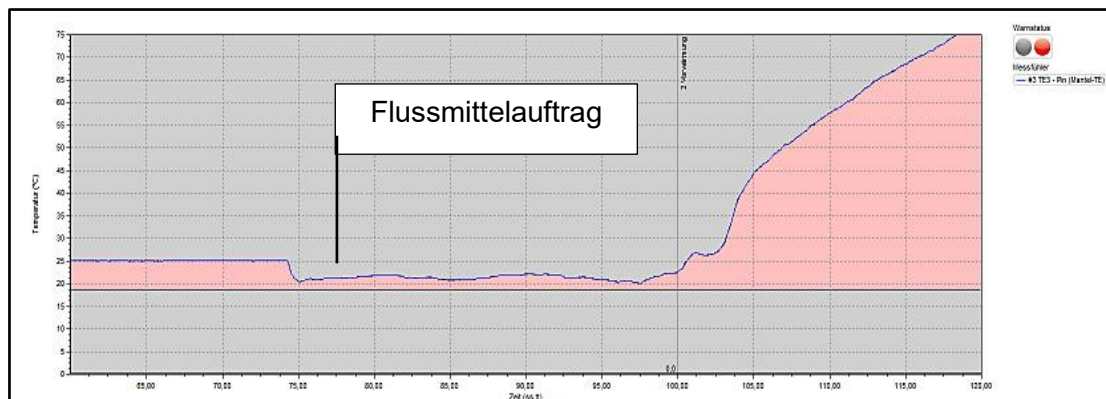


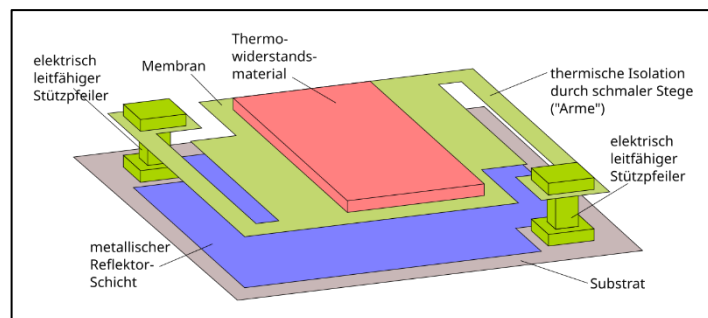
Bild 4. Ausschnitt aus Temperaturprofilaufnahme mit Thermoelement.

Auf Basis dieser Erkenntnisse entstand die Fragestellung, ob sich dieser Abkühleffekt nicht nur punktuell über Thermoelemente, sondern flächig mittels Wärmebildkamera erfassen lässt. Der erwartete Vorteil lag in der Auswertbarkeit größerer Flächen bis hin zu kompletten Produktbereichen, auch bei mehreren Leiterplatten innerhalb eines Löttrahmens.

Als potenziell kritisch wurde das zeitliche Verhalten der Abkühlung bewertet, insbesondere im Hinblick auf eine räumliche Trennung zwischen Flussmittelauftrag und Wärmebildkamera. Ziel war es, eine ausreichende Detektierbarkeit sicherzustellen und gleichzeitig eine Verschmutzung der Kamera durch Flussmittel zu vermeiden.

Wärmebildkameras bestehen unter anderem aus den folgenden wesentlichen Komponenten:

- a. Dem Objektiv, das die Wärmestrahlen bündelt und dem Detektor zuführt. Die Brennweite ist entscheidend für die auswertbare Objektgröße.
- b. Dem Infrarotdetektor mit Sensor-Array, das zur Erfassung der Wärmestrahlung dient – in der Regel in Form eines Mikrobolometers. Dabei werden Materialien mit einem stark temperaturabhängigen Widerstand eingesetzt, wie zum Beispiel Vanadiumoxid. Dieses wird als nur wenige Mikrometer dünne Scheibe hergestellt und über einer reflektierenden Metallschicht angeordnet. Die thermische Entkopplung der empfindlichen Bolometer-Elemente erfolgt durch zwei gebogene, dünne Anschlussdrähte, wodurch der Wärmeeintrag in die Struktur minimiert wird.
- c. Einem Signalprozessor, der eine elektrische Verstärkung, Kalibrierung und Weiterverarbeitung realisiert.

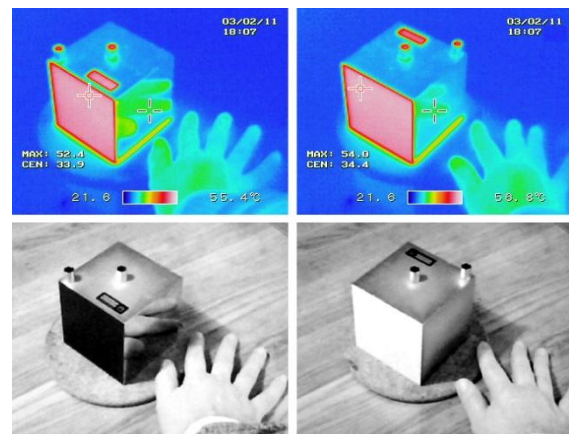


Vereinfachte Darstellung eines Mikrobolometers.

Quelle: Wikipedia/Michael Frey

Weitere grundlegende Aspekte der Idee:

- a. Verdampfungsenthalpie
Flüssigkeiten verdunsten bereits bei Temperaturen unterhalb ihres Siedepunktes, bis sich ein Gleichgewichtszustand mit der Umgebung einstellt. Die für die Verdunstung erforderliche Energie wird der Umgebung entzogen und damit auch der Oberfläche, auf der sich das Medium befindet. Dieser Energieentzug führt zu einer lokalen Abkühlung der Oberfläche. Bei Alkohol ist dieser Effekt im Vergleich zu Wasser stärker ausgeprägt, da Alkohol eine höhere Verdunstungsneigung aufweist.
- b. Emissionskoeffizient von Oberflächen
Der Emissionskoeffizient ist materialabhängig. Er beschreibt das Verhältnis der tatsächlich abgegebenen Wärmestrahlung einer Oberfläche zur Strahlung eines idealen schwarzen Körpers gleicher Temperatur. Die im betrachteten Anwendungsbereich relevanten Materialien besitzen zwar ähnliche, jedoch nicht identische Emissionskoeffizienten. Dadurch können, vergleichbar mit dem Prinzip des Leslie-Würfels, unterschiedliche Materialien selbst bei gleicher Temperatur mithilfe einer Wärmebildkamera unterschieden werden.



Zwei Ansichten eines Leslie-Würfels mit einer Wärmebildkamera im Vergleich mit schwarz-weiß-Bildern im sichtbaren Bereich. Quelle: Wikipedia/Pieter Kuiper

Zusammenhang für die Anwendung:

Beide Effekte – die durch Verdunstung verursachte Temperaturreduktion sowie materialabhängige Unterschiede im Emissionskoeffizienten – ermöglichen es, mit einer Wärmebildkamera das Vorhandensein von Flussmittel auf Leiterplatten zu detektieren.

3 Vorversuche

Erste Vorversuche mit manuellem Flussmittelauftrag bestätigten das grundsätzliche Potenzial dieses Ansatzes und führten zur weiteren Verfolgung der Idee bis hin zur Patentanmeldung [1].

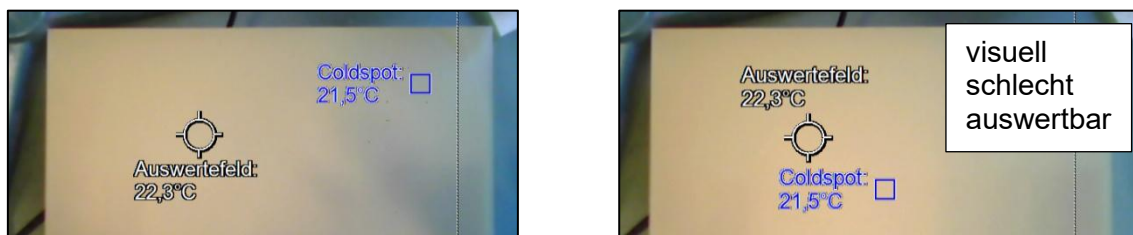


Bild 5. Visuelles Bild vor (links) und nach (rechts) dem Flussmittelauftrag.

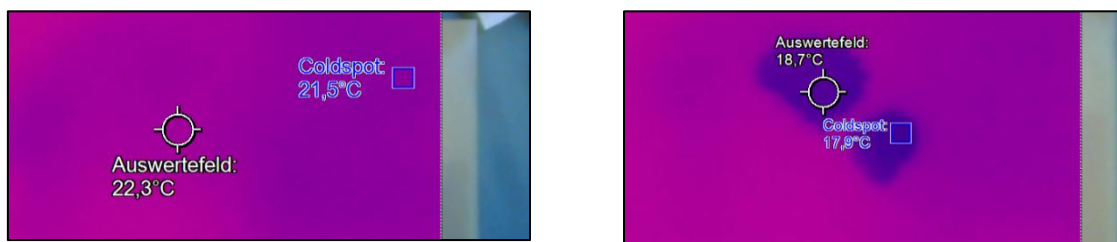


Bild 6. Wärmebildaufnahme vor (links) und nach (rechts) dem Flussmittelauftrag.

Auf Basis der positiven Ergebnisse der Vorversuche wurden konkrete Einsatzszenarien für die industrielle Elektronikfertigung abgeleitet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Entwicklung eines Systems, das sich mit geringem Integrationsaufwand inline in Fertigungslinien einbinden lässt.

Perspektivisch wurde zudem die Nutzung moderner, auch KI-gestützter Auswertelgorithmen berücksichtigt.

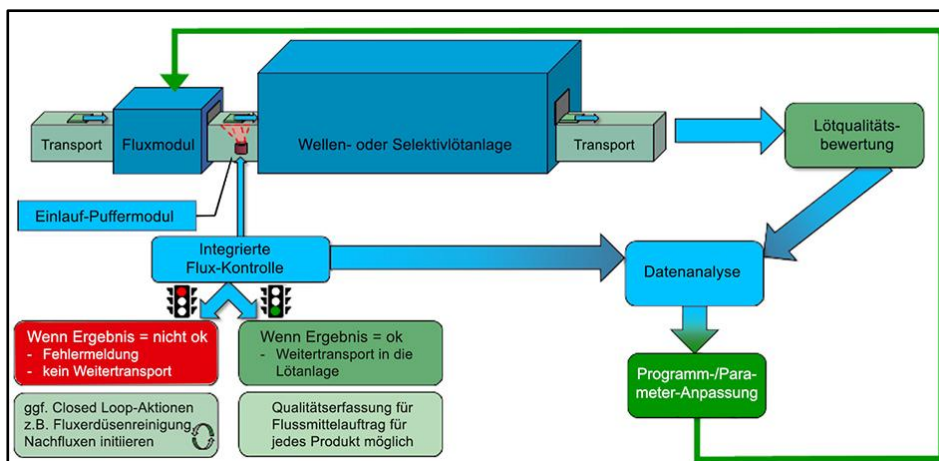


Bild 7. Mögliche Nutzungsszenarien

4 Erprobung

A. Wellenlötprozesse

Im Rahmen der Erprobung wurden Wärmebildaufnahmen unmittelbar nach dem Flussmittelauftrag vor der Wellenlötanlage durchgeführt.

Die Versuche zeigten, dass weniger oder ungleichmäßig gefluxte Bereiche eindeutig identifiziert werden können und der Abkühleffekt auch über einen Zeitraum von bis zu mehreren Minuten hinweg zuverlässig mittels Wärmebildkamera detektierbar ist.

Zu berücksichtigen ist dabei der Abstand zwischen Wärmebildkamera und Baugruppe. Für die Erfassung größerer Baugruppenbereiche ist ein entsprechend großes Bildfeld erforderlich, was die Auswahl geeigneter Objektive notwendig macht. Zudem dürfen sich keine Störquellen zwischen Kamera und Baugruppe befinden, die das Sichtfeld einschränken oder Abschattungen verursachen könnten.

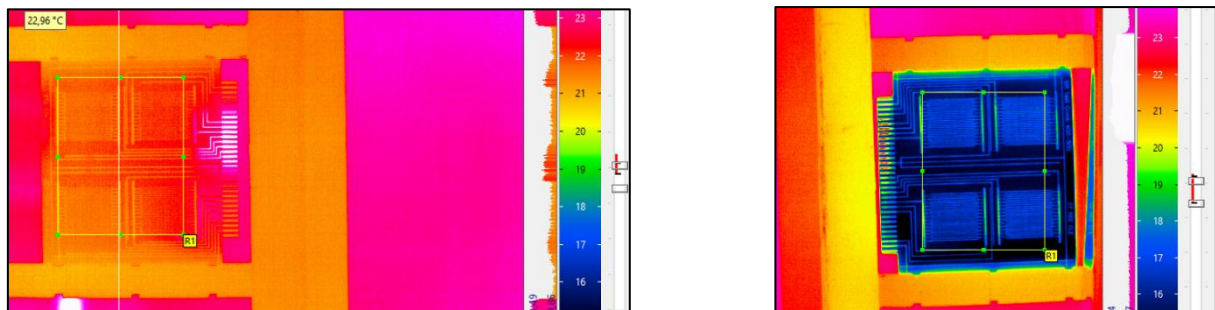


Bild 8. Wärmebildaufnahme vor Flussmittelauftrag (links) und danach (rechts).

B. Selektivlötprozesse

Bei Selektivlötprozessen wird Flussmittel typischerweise nur lokal in den später zu lötenden Bereichen aufgebracht. Für die Versuche wurde daher eine bei SIEMENS weit verbreitete Testleiterplatte („Quick and Easy“-Teststruktur für Selektivlöten) eingesetzt, auf der der Flussmittelauftrag gezielt in Linien- und Punktstrukturen erfolgte.

Für eine aussagekräftige Auswertung selektiver Flussmittelaufträge ist eine ausreichende Pixelauflösung der Wärmebildkamera erforderlich. In den Versuchen kamen Systeme mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln zum Einsatz. Die Experimente bestätigten, dass diese Auflösung für typische Anwendungen im Selektivlötprozess ausreichend ist, um auch kleine benetzte Flächen sicher zu detektieren.



Bild 9. Wärmebildaufnahme vor Flussmittelauftrag (links) und nach Flussmittelauftrag (rechts)

5 Zusammenarbeit

Da die SIEMENS AG das Verfahren für die eigenen Elektronikfertigungen nutzbar machen wollte, jedoch selbst kein Hersteller von Lötanlagen ist, wurde eine Kooperation mit der SEHO Systems GmbH aufgebaut. Zwischen SIEMENS und SEHO wurde eine entsprechende Lizenzvereinbarung geschlossen.

Gemeinsam bewarben sich die Partner um den productronica Innovation Award bei der Weltleitmesse für Elektronikfertigung in München 2025, und erreichten den zweiten Platz im Cluster „Future Markets“.

Darüber hinaus wurde eine gemeinsame Piloterprobung in einer Fertigung bei SIEMENS DI MC in Erlangen geplant und umgesetzt. In diesem Kontext erfolgte auch eine enge Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Wärmebildkameras.

Diese Kooperation stellt ein praxisnahes Beispiel für eine erfolgreiche technologiegetriebene Zusammenarbeit zwischen Anwender und Anlagenlieferant dar. Die gemeinsam entwickelte Lösung ermöglicht erstmals eine inlinefähige, automatisierte Kontrolle des Flussmittelauftrags für jede einzelne Leiterplatte direkt im laufenden Fertigungsprozess.

Funktionsweise des Systems:

Die thermografische Erfassung des Flussmittelauftrags erfolgt innerhalb einer definierten Zeitspanne unmittelbar nach dem Fluxen. Die anschließende bildbasierte Auswertung basiert auf einem zuvor festgelegten Referenzbild. Dieses kann entweder eine thermografische Aufnahme einer unbehandelten Leiterplatte oder ein digitaler Zwilling aus dem CAD-System sein.

Anhand der gemessenen Temperaturunterschiede werden die benetzten Flächen hinsichtlich ihrer Lage und Ausdehnung analysiert. Auf dieser Grundlage trifft das System eine automatisierte Freigabeentscheidung für den nachfolgenden Lötprozess. Nur bei eindeutiger Übereinstimmung mit den vordefinierten Sollwerten wird der Lötprozess automatisch fortgesetzt. Bei Abweichungen generiert das System eine Fehlermeldung und sperrt den Einlauf zur Lötanlage. Optional können zusätzliche Maßnahmen wie eine automatische Reinigung der Fluxerdüse oder ein erneuter Flussmittelauftrag ausgelöst werden.

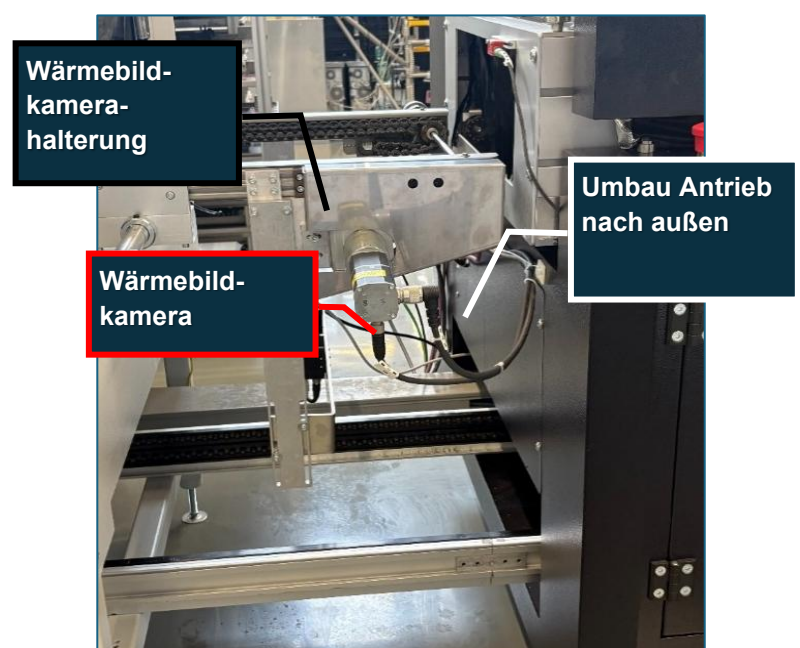


Bild 10. Testaufbau des Systems
in der Pilotphase

6 Ergebnis

Die inlinefähige, thermografische Überwachung des Flussmittelauftrags schließt eine bislang bestehende Lücke in der Prozessüberwachung. Fehlerhafte oder unvollständige Flussmittelaufträge werden bereits vor dem eigentlichen Lötprozess erkannt und gezielt angesteuert.

Dies führt zu einer nachweisbaren Steigerung der Fertigungsqualität, einer signifikanten Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeit sowie zu einer höheren Gesamtanlageneffizienz. Gleichzeitig schafft das System die notwendige Datenbasis für eine zukünftige KI-basierte Prozessregelung, bei der Parameter automatisch angepasst werden.

7 Umsetzung in die Serie und Ausblick

Für den Serieneinsatz wurde besonderer Wert auf eine robuste, reproduzierbare und wartungsarme Auslegung des Systems gelegt. Die Integration in Linienkonzepte erfolgt inline und ohne Beeinflussung der Taktzeit. Mechanische Schnittstellen, Kamerapositionierung sowie Schutzkonzepte gegen Verschmutzung sind dabei auf den industriellen Dauerbetrieb ausgelegt.

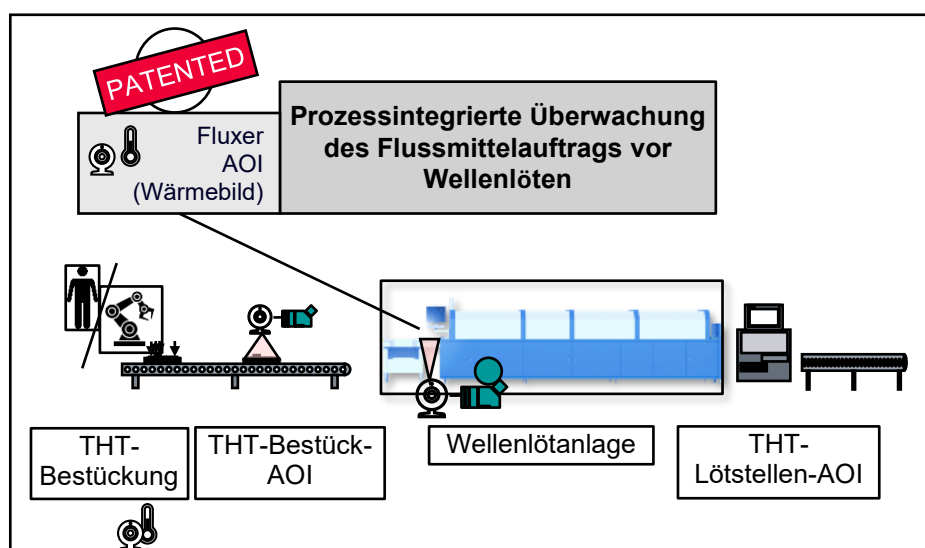
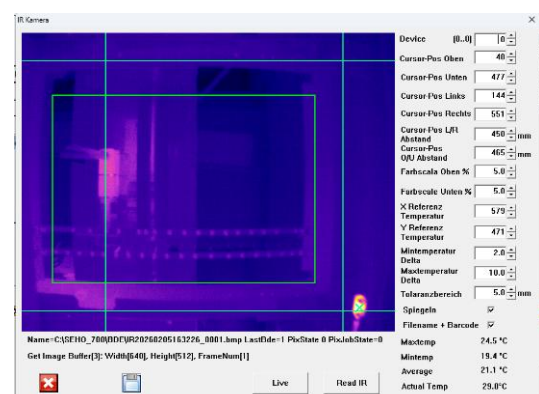


Bild 11. Integration des Systems in automatische Fertigungslinien.

Die modulare Systemarchitektur ermöglicht die Anpassung an unterschiedliche Leiterplattenformate und Prozessvarianten. Damit eignet sich die Lösung sowohl für Neuanlagen als auch für die Nachrüstung bestehender Fertigungslinien.

Bild 12. Einstellfenster 'Prozessintegrierte Überwachung des Flussmittelauftrags'.



Weitere Anwendungsmöglichkeiten der thermografischen Überwachung sind bereits in der Testphase. Hierzu gehören beispielsweise die prozessintegrierte Überwachung von Miniwellen und Multiwellen in Selektivlötprozessen.

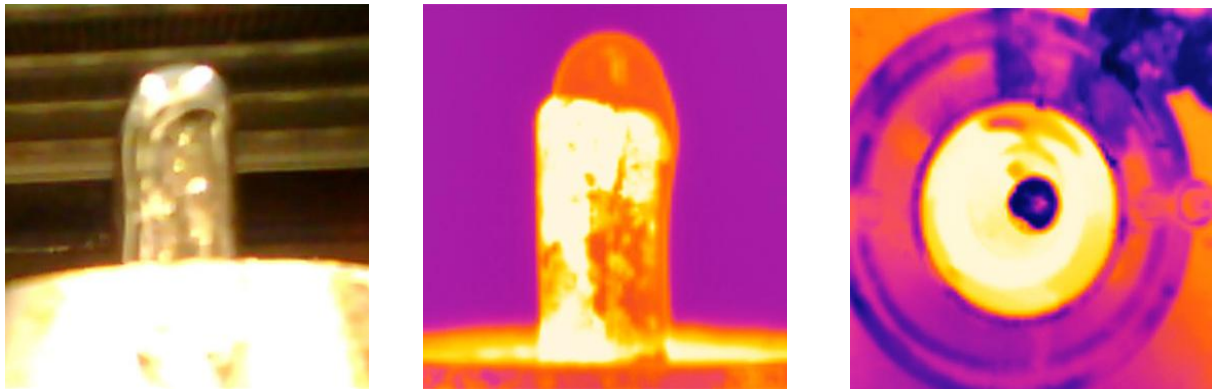


Bild 13. Beispiel für die thermografische Überwachung einer Miniwellen-Lötdüse: schlechter Lotfluss.

Schon heute ist die thermografische Flussmittelüberwachung für die Integration in das SIEMENS Industrial Edge Ökosystem vorbereitet.

Gleichzeitig schafft das System die notwendige Datenbasis für eine zukünftige KI-basierte Analyse mit dem Ziel einer automatischen, kontinuierlichen Optimierung der Prozessparameter in Echtzeit.

Damit wird der Grundstein für eine adaptive, autonome Fertigung gelegt, in der Prozessstabilität, Qualität und Effizienz systematisch und datenbasiert weiterentwickelt werden.

[1] Europäische Patentanmeldung SIEMENS AG, veröffentlicht am 19.02.2025 im Patentblatt 2025/08.