

## Prozessgeregeltes Einzelpunktlöten mit Licht

In der modernen Elektronikfertigung kann auf das automatisierte Einzelpunktlöten nicht verzichtet werden. Hierdurch können auch Kabel, Stecker, Sonderbauteile und Baugruppen mit nur wenigen Lötstellen trotz hohem Kostendruck wirtschaftlich gelötet werden. Bisher wurden vorwiegend prozessgesteuerte Selektivlötanlagen eingesetzt, die experimentell aufwendig an neue Lötaufgaben angepasst werden mussten.

Gerade beim Einzelpunktlöten lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben mit den innovativen Verfahren Licht- oder Laserlöten anforderungsgerecht lösen. Die Vorteile bei diesen Verfahren sind eine berührungslose lokal begrenzte Erwärmung der Lötstellen ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung. Über die Leistung der Energiequelle lässt sich die Temperatur der Lötstelle online beeinflussen und die Wärmeeinbringung gut dosieren. Voraussetzung hierzu ist jedoch eine temperaturbasierte Regelung der Leistung, um Oberflächeneffekte zu kompensieren.

Mit der hier vorgestellten Prozessregelung lässt sich die Qualität von Lötverbindungen und die Wirtschaftlichkeit des Lötvorgangs in Verbindung mit einem Lichtlötssystem deutlich steigern.

### Anforderungen an die Prozessregelung

Beim kontrollierten Erwärmen einzelner Lötstellen muss eine praxismgerechte Prozessregelung die folgenden Anforderungen erfüllen:

- schnelles Einregeln der Temperatur auf einen gewünschten Sollwert,
- konstantes Einhalten der Solltemperatur über einen definierten Zeitraum,
- stabiles Prozessverhalten auch bei auftretenden Störungen,
- Flexibel programmierbare Parameter für die nachträgliche Feinabstimmung und
- Portierbarkeit der Regelalgorithmen.

Bild 1 zeigt den angestrebten zeitlichen Temperaturverlauf und bezeichnet einzelne Prozesszeiten und -abschnitte.

Beim Vorwärmen in Abschnitt 1 muss die Lötstelle für kurze Prozesszeiten möglichst schnell auf die gewünschte Solltemperatur erwärmt werden. Dabei darf die Temperaturkurve für eine stabile kalkulierbare Prozessführung nur unwesentlich überschwingen und sollte idealerweise flach in die konstante Solltemperatur übergehen.

Mit Erreichen der Löttemperatur wird kalter Lotdraht zugeführt (Abschnitt 2), der aufgeheizt und aufgeschmolzen werden muß. Hierzu benötigt die Lötstelle zusätzliche Energie, um die Temperatur konstant zu halten.

Nach der Lotzufuhr soll die Lötstelle eine kurze Zeit auf Löttemperatur gehalten werden (Abschnitt 3), damit das Lot fließen kann und alle zu kontaktierenden Oberflächen benetzt werden. Da kein weiteres Lot aufgeschmolzen werden muß, ist der Energiebedarf geringer als in der vorangegangenen Phase.

Ziel der Abkühlphase in Abschnitt 4 ist es die Lötverbindung auf Umgebungstemperatur herunterzukühlen. Hierbei werden kurze Abkühlzeiten angestrebt, da sie kurze Prozesszeiten und eine hohe Festigkeit der Lötstelle bewirken.

Der Regelkreis wird von der Lötstelle, einem Temperatursensor, dem Regler, der Leistungselektronik und dem Lichtlötkopf gebildet und ist schematisch in Bild 2 dargestellt. An den Temperatursensor werden folgende Anforderungen gestellt:

berührungslose und schnelle Erfassung der Lötstellentemperatur,  
Messfleckgröße = Größe der Lötstelle,  
Messbereich von 20 °C bis 500 °C und  
großer Abstand zur Lötstelle.

Entsprechend den Anforderungen wurde ein Pyrometer als Temperatursensor ausgewählt. Die aktuelle Temperatur der Lötstelle wird berührungslos erfasst, dem Regler zugeführt und in ein Ausgangssignal für die Leistungselektronik des Halogenstrahlers umgesetzt. Die Lotzufuhr wirkt als Störgröße auf den Erwärmungsprozess ein.

### **Entwicklungssystem zur Realisierung**

In Kooperation zwischen der Firma ATN Automatisierungstechnik Niemeier GmbH (ATN) und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU-Berlin wurde der schematische Regelkreis mit einem Entwicklungssystem nachgebildet. Seine wesentlichen Komponenten sind ein Signalmanager, die Mess- und Leistungselektronik sowie ein Lichtlötkopf der Firma ATN, bestehend aus Halogenstrahler, Lotdrahtvorschub und Pyrometer.

Der Signalmanager wurde vom IWF entwickelt und ist ein Softwaresystem zur zeitsparenden Entwicklung und Erprobung von Algorithmen in einer Hochsprache am PC. Die Ergebnisse dieser ablauffähigen Anwenderprogramme können in Echtzeit am Monitor mitverfolgt und durch Modifizierung sehr effizient optimiert werden. Der Signalmanager steuert den Prozess durch sequentielle Interpretation der Befehle im Anwenderprogramm. Er ließt von der Messelektronik ein temperaturproportionales Pyrometersignal der Lötstelle, vergleicht es mit einer definierten Solltemperatur und berechnet entsprechend der Regelung ein Stellsignal. Zur kontrollierten Erwärmung der Lötstelle wird dieses Signal in der Leistungselektronik in eine Lampenspannung umgesetzt. Sind vordefinierten Grenzwerte erreicht, wird der Lotdrahtvorschub zugeschaltet und der Lötstelle innerhalb einer festen Zeitspanne ein vorher berechnetes Lotvolumen zugeführt. Zur visuellen Beurteilung umgesetzter Regelungsalgorithmen wird der zeitliche Temperaturverlauf während des Lötprozesses am Bildschirm angezeigt. Daneben besteht die Möglichkeit bei Bedarf weitere Informationen in Textform auszugeben.

## Realisierung der Regelalgorithmen

Aufgrund der hohen Prozessdynamik beim Löten ist ein PI-Regler sinnvoll, da er den stabilisierenden Einfluss des P-Reglers und den Vorteil der fehlenden bleibenden Regelabweichung des I-Reglers miteinander verbindet.

Allgemein gilt für die Übertragungsgleichung des PI-Reglers:

$$x_a = K_p \cdot x_e + K_i \cdot \int x_e dt$$

Angewendet auf den Lötprozess ist  $x_a$  die Führungsgröße „Lampenleistung“ und  $x_e$  die Regelgröße, die aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Temperatur gebildet wird.  $K_p$  und  $K_i$  sind Regelkonstanten die das Prozessverhalten beeinflussen und beispielsweise bei der Erprobung experimentell optimiert werden können. Diese Angaben werden in den Algorithmus überführt:

Ist-Temperatur einlesen

Temperaturdifferenz aus Soll- und Ist-Temperatur bilden

Flächenzuwachs berechnen (I-Regelkonstante \* Temperaturdifferenz \* Intervallschritt)

Proportionalen Leistungsanteil berechnen (P-Regelkonstante \* Temperaturdifferenz)

Integralen Leistungsanteil berechnen (Gesamtfläche + Flächenzuwachs)

Neue Lampenleistung berechnen (proportionaler + integraler Leistungsanteil)

Gesamtfläche um Flächenzuwachs erhöhen

Da der Lötprozess dynamisch ist wird diese Programmsequenz zyklisch in konstanten Intervallschritten durchlaufen. Bei jedem Durchlauf wird die aktuelle Lampenleistung zur Minimierung der Regelabweichung berechnet und an die Leistungselektronik übertragen.

Die wichtigste Voraussetzung für eine online Prozessregelung beim Einzelpunktlöten ist die korrekte Erfassung der Prozess Temperatur im Bereich der Lötstelle. Hierzu wurde das Pyrometer mit einem Mantelthermoelement als Vergleichsaufnehmer direkt an einer Lötstelle bei unterschiedlichen Temperaturen kalibriert.

## Erprobung des Reglers

Der regelungstechnische Algorithmus wurde zusammen mit den Routinen zur Leistungs- und Lotdrahtsteuerung in ein Anwenderprogramm umgesetzt und erprobt.

Für qualitative Aussagen über das Regelverhalten wurden Versuchproben gelötet und die aufgenommenen Temperaturprofile sowie die zugehörigen Lötverbindungen visuell bewertet.

Nach experimenteller Variation der Regelkonstanten, der Intervalldauer und des Lotvolumens sowie mehreren Versuchen mit verschiedenen Solltemperaturen zeigten sich optisch gute Lötstellen ohne Verbrennungen an der Platine oder den Lötkontakten. Bei allen Lötversuchen entsprach der Temperaturverlauf nahezu der Darstellung in Bild 4. Es zeigt die Oberfläche des Signalmanagers mit den gewählten Vorgaben im Anwenderprogramm, dem zeitlichen Temperaturverlauf an der Lötstelle und wesentlichen Prozessparametern in Textdarstellung. Deutlich ist ein „Temperatureinbruch“ beim Zuführen von Lotdraht zu erkennen, der aber schnell

wieder ausgeregelt wird. Die trotz der Störgröße „Lotdrahtzufuhr“ gut eingehaltene Solltemperatur wird in kurzer Zeit erreicht. Die Zuführ- und Nachwärmzeit lässt sich noch reduzieren, so dass kürzere Prozesszeiten erzielt werden können. Das Prozessverhalten ist als stabil zu bewerten.

Durch die Regelung wurde nicht nur die Prozeßqualität wesentlich erhöht, sondern auch die Bedienung wesentlich vereinfacht. Waren zuvor mit den Zeitparametern Vorwärm- Lotzuführ und Nachwärmzeit sowie Lichtleistung und Lotgeschwindigkeit 5 voneinander abhängige Parameter zu optimieren gehen nun Löttemperatur und Lotmenge als einfach zu bestimmende Kenngrößen ein. Da während der Lotzuführung die Temperatur konstant gehalten wird, wird der Prozeß nahezu unabhängig von der Lotgeschwindigkeit. Beim geregelten Prozeß sind lediglich die Reglerparameter  $K_p$  und  $K_i$  zu wählen.

### **Portierung des Reglers auf das Zielsystem**

Im nächsten Schritt wurde der Regelalgorithmus auf das Zielsystem portiert. Für den Einsatz in der rauen Fertigungsumgebung fiel die Entscheidung auf den bewährten 8-Bit Microcontroller HC 05 von Motorola. Die Signalanpassung und die Verbindung mit der Peripherie erfolgt durch die Hardwareumgebung, in die zur grafischen Anzeige auch ein Display mit 2x20 Zeichen integriert ist. Die Parametrierung wird menügeführt über 5 Tasten am Frontpanel oder über eine RS232-Schnittstelle mit einem Parametrierungsprogramm auf einem PC unter Windows durchgeführt. Übergeordnete Funktionen der Regelung werden in der Hochsprache Basic programmiert. Der eigentliche Algorithmus mit den zeitkritischen Berechnungen ist in Assembler realisiert.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

In den vergangenen Jahren hat das automatisierte Einzelpunktlöten stark an Bedeutung gewonnen. Mit innovativen Verfahren wie Licht- oder Laserlöten und geregelten Lötprozessen kann dabei auch bei den sogenannten Restlötstellen die wachsende Forderung nach höherer Qualität bei wirtschaftlichen Lötverbindungen erfüllt werden. So hat allein das Berliner Unternehmen ATN in den vergangenen 2 Jahren über 35 Licht- und Laserlötanlagen installiert. Bisher verfügen die Systeme über einen offenen Regelkreis und bilden definierte Leistungsprofile ab. Durch eine temperaturbasierte Prozeßregelung, kann jedoch die Programmierung noch mehr vereinfacht und weitere Anwendungsfelder erschlossen werden. Obwohl technische Restriktionen berührungsloser Temperaturlötmesswerte verfälschen können, sind sie durchaus zum Aufbau praxistauglicher Regelkreise geeignet. Mit der hier vorgestellten Prozessregelung, basierend auf einem Pyrometer einem PI-Regler und einem Lichtlötssystem lassen sich qualitativ hochwertige Lötresultate bei kurzen Prozesszeiten erzielen. Die Regelalgorithmen wurden auf einen Mikrocontroller portiert und können durch Variation der Regelparameter problemlos an neue Lötaufgaben adaptiert werden. Optimal wird

das Regelverhaltens durch softwaretechnische Überwachung definierter Kenngrößen und der entsprechenden Reaktion auf ihre Änderungen.

### **Autoren dieses Beitrags**

Dr.-Ing. **Jörg Niemeier**, geb. am 06.09.1967, studierte Informatik und Maschinenbau an der TU Berlin und promovierte als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin. Seit 1996 ist er geschäftsführender Gesellschafter der Firma ATN Automatisierungstechnik Niemeier GmbH Berlin. ATN entwickelt, produziert und vertreibt Komponenten, Systeme und Software für die Elektronikfertigung und ist Marktführer für Lichtlötssysteme zum automatisierten Einzelpunktlöten.

Dipl.-Ing **Andreas Sonntag**, geb. am 28.03.1960, studierte Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktionstechnik an der TU Berlin und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Montagetechnik und Fabrikbetrieb am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin.

### **Öffentliche Förderung**

Die Arbeiten der ATN wurden mit dem Thema „Selektives Reflowlöten“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) gefördert (Förderkennzeichen FKZ 340/01).

Die Arbeiten der TU Berlin wurden mit dem Thema „Prozeßmodell zur Optimierung des Einzelpunktlötens“ durch Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert (Förderkennzeichen Se 485/15-2)