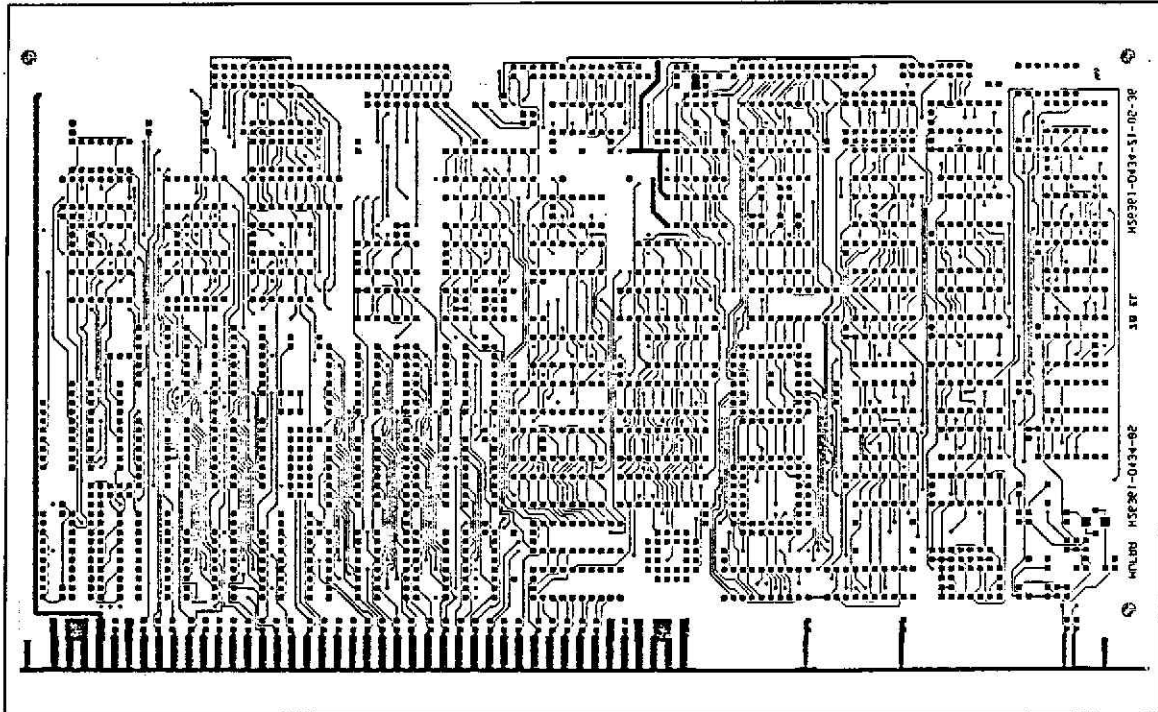


Verfahrensoptimierung bei Maskenerstellung und Produktion von Leiterplatten



Aufgabenstellung

Im Bereich der Leiterplattenfertigung werden Produktionsmasken mit mechanischen Plottern hergestellt und das abschließende Bohren mit mechanischen Bohrmaschinen vorgenommen, dabei ist die Frage zu beantworten, ob diese Bewegungen in bestmöglicher Weise erfolgen.

Die Masken für die photochemische Herstellung von Leiterplatten werden mit einem Plotter gezeichnet. Dieser Plotter kann Linien unterschiedlicher Breite zeichnen und Punkte unterschiedlicher Größe belichten. Linienbreite und Punktgröße werden durch die Wahl geeigneter Blenden bestimmt. Eine Linie wird gezeichnet, indem die Belichtungseinrichtung mit geschlossener Blende an einem der beiden Endpunkte der Linie positioniert wird und sich dann mit geöffneter Blende zu dem anderen Endpunkt bewegt, wo dann die Blende wieder geschlossen wird. Ein Punkt wird "geblitzt", indem die Position des Punktes mit geschlossener Blende angefahren wird, die Blende kurz geöffnet und dann wieder geschlossen wird.

Beim Zeichnen und Blitzen entstehen Leerwege (Verfahrwege) durch notwendige Positionierungsbewegungen, die simultan in horizontaler und vertikaler Richtung erfolgen können. Der Durchsatz des Plotters kann dadurch erhöht werden, daß eine Reihenfolge der Belichtungsaktionen bestimmt wird, die zu einer möglichst kurzen Gesamtzeit für Positionierungen führt (die Zeit zum Belichten der Strukturen ist unabhängig von dieser Reihenfolge).

In einem abschließenden Produktionsschritt sind Löcher zur Aufnahme von Bauteilen in die Platine zu bohren. Hierbei entstehen Leerwege durch Bohrerwechsel sowie ebenfalls durch Positionierungen. Die Zeit zum Bohren ist unabhängig von der Reihenfolge der Bohroperationen. Die gesamte Produktionszeit kann somit durch Berechnung günstigster Reihenfolgen verringert werden.

Zielsetzung

Das Ziel war es, durch Integration entsprechender Optimierungssoftware in den Produktionsablauf die Verfahrwege für die Positionierungen bei der Leiterplattenproduktion signifikant zu reduzieren.

Modellierung und Lösungsansatz

Das Bohrproblem kann als spezielles Zeichenproblem aufgefaßt werden, in dem nur Punktstrukturen zu belichten sind. Den Bohrerwechsel betreffende, technische Rahmenbedingungen führen noch zu einer Modellvereinfachung.

Das Zeichenproblem wird als graphentheoretisches Optimierungsproblem modelliert. Technische Rahmenbedingungen erfordern hierbei die isolierte Behandlung der unterschiedlichen Blenden in Teilproblemen. Für die Belichtung der Punktstrukturen mit einer festen Blende liefert das Travelling Salesman Problem das adäquate Modell. Das Travelling Salesman Problem besteht anschaulich darin, eine kürzeste Rundreise (Tour) durch eine gegebene Menge von Städten zu bestimmen, wobei jede Stadt genau einmal besucht wird. Die Behandlung der Linienstrukturen erfordert eine Erweiterung dieses Modells durch die Zusatzforderung, daß gewisse Verbindungsstrecken benutzt werden müssen. Hier ergibt sich das sogenannte Rural-Postman Problem. Die Verknüpfung der Teilprobleme liefert ein weiteres Optimierungsproblem. Alle diese Probleme sind im Sinne der Komplexitätstheorie als sehr schwierig einzustufen, dabei standen pro Leiterplatte nur wenige Minuten Rechenzeit zur Verfügung.

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung ist die Bestimmung der Verfahrzeiten. Es lassen sich zwar nach Herstellerangaben sehr komplexe Formeln zur Berechnung dieser Zeiten angeben. Tests ergaben aber, daß diese Formeln zum einen hohen Rechenaufwand erfordern und zum anderen immer noch recht ungenau sind. Zur Approximation der Verfahrzeiten wurde daher die Maximum-Distanz gewählt, die im Gegensatz

zur Euklidischen Distanz modelliert, daß die Belichtungseinrichtung des Plotters gleichzeitig in horizontaler und in vertikaler Richtung bewegt werden kann.

Lösungsverfahren

Wegen strenger Realzeitanforderungen und der Größe der Probleme konnte keine Standardsoftware eingesetzt werden. Die verwendeten Algorithmen basieren auf Heuristiken zur Lösung von Travelling Salesman Problemen, z.B. der Nearest-Neighbour Heuristik, die Touren durch bevorzugte Berücksichtigung kurzer Verbindungen bestimmt, und der Lin-Kernighan Heuristik, die diese Startlösungen mittels lokaler Modifikationen verbessert. Die Heuristiken wurden für die vorliegende konkrete Anwendung weiterentwickelt und adaptiert.

Durch den Einsatz komplexer Datenstrukturen und spezieller Verfahren zur Behandlung sehr großer Probleme konnten auch die Realzeitanforderungen erfüllt werden.

Ergebnisse

Der Nutzen der Verfahren wurde an einigen für den Anwender typischen Leiterplatten exakt ermittelt. Beim Zeichnen von Leiterplattenmasken führte die Optimierung zu einer Reduktion der Verfahrszeit um durchschnittlich etwa 50%. Die Produktionszeit konnte hierdurch durchschnittlich um etwa 18% verringert werden. Beim Bohren ergaben sich Wegreduzierungen um durchschnittlich etwa 30%, was zu Produktionszeitverkürzungen um etwa 8% führte. Die Verfahren wurden aufgrund dieser sehr guten Resultate in den praktischen Betriebsablauf integriert.

Autoren

Gerhard Reinelt
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 294
69120 Heidelberg

Michael Jünger
Universität zu Köln
Pohligstraße 1
50969 Köln

Anwender

SIEMENS AG
Werk für Systeme
Werner-von-Siemens-Straße
86159 Augsburg

Weitere Anwendungen

Transport- und Reihenfolgeprobleme (z.B. Fahrzeugeinsatzplanung, Steuerung von Hochregallagern, Steuerung allgemeiner NC-Maschinen)

Literatur

- Grötschel M, Jünger M, Reinelt G (1991) Optimal Control of Plotting and Drilling Machines: A Case Study, Zeitschrift für Operations Research - Methods and Models of Operations Research 35:61-84
- Reinelt G (1994) Contributions to Practical Travelling Salesman Problem Solving, erscheint in: Lecture Notes in Scientific Computing (Springer)