

Forschungsberichte

iwb

Band 148

Frank Rick

***Simulationsgestützte
Gestaltung von Produkt
und Prozess am Beispiel
Laserstrahlschweißen***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iw**b**

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iw**b**)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0008-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung und Eingrenzung	3
1.3	Vorgehensweise	5
2	Grundlagen und Stand der Technik	8
2.1	Grundlagen des Laserstrahlschweißens	9
2.1.1	Prinzip des Laserstrahlschweißens.....	9
2.1.2	Charakterisierung des Laserstrahls	11
2.1.3	Prozessparameter und fertigungstechnische Einflussgrößen .	14
2.1.4	Vorteile und Hemmnisse des Laserstrahlschweißens.....	16
2.2	Grundlagen der Produkterstellung.....	18
2.2.1	Einordnung und Begriffe	18
2.2.2	Aufgaben und Methoden der Konstruktion.....	19
2.2.3	Integrierte Produktentwicklung.....	22
2.2.4	CAX-Technologien in der Produkterstellung.....	23
2.2.5	Schweißgerechte Konstruktion	26
2.3	Berechnung von Schweißverbindungen	30
2.3.1	Grundlagen der Berechnung.....	30
2.3.2	Statische Beanspruchung	32
2.3.3	Dynamische Beanspruchung	33

2.4	Simulation von Schweißverbindungen	39
2.4.1	Finite Elemente Methode	39
2.4.2	Prozesssimulation	41
2.4.3	Produktsimulation.....	43
2.5	Bewertung des Stands der Technik	45
3	Methode zur Ermittlung der Eigenschaften lasergeschweißter Bauteile	49
3.1	Einflussgrößen auf die Bauteileigenschaften	49
3.2	Strahl-Stoff-Wechselwirkungen im Schweißprozess.....	51
3.3	Methode.....	53
4	Modelle zur Wechselwirkung von Schweißprozess und Bauteil.....	57
4.1	Einfluss des Schweißprozesses auf die Nahteigenschaften	57
4.1.1	Energieeinkopplung.....	57
4.1.2	Wärmeleitung	60
4.1.3	Metallurgie, Härte und Festigkeit.....	61
4.1.4	Eigenspannungen	69
4.2	Einfluss der Nahteigenschaften auf das Bauteil.....	73
4.2.1	Statische Beanspruchung.....	73
4.2.2	Dynamische Beanspruchung.....	76
5	Simulation von Schweißprozess und Lastfall.....	79
5.1	Thermische Simulation des Schweißprozesses.....	79
5.1.1	Modell des konstruktiven Details	80
5.1.2	Energieeinkopplung.....	81

5.1.3	Resultierende mikroskopische Nahteigenschaften	83
5.2	Thermomechanische Simulation des Schweißprozesses.....	86
5.2.1	Modell des Bauteilausschnittes und Energieeinkopplung	87
5.2.2	Resultierende makroskopische Nahteigenschaften	88
5.3	Mechanische Simulation des Lastfalles.....	92
5.3.1	Modell des Bauteils mit Naht.....	92
5.3.2	Resultierende Bauteileigenschaften.....	95
5.4	Integration der Simulation und Hilfsmittel	97
5.4.1	Integration der Simulationsschritte.....	97
5.4.2	Hilfsmittel zur Modellerstellung und Optimierung.....	99
6	Verifizierung und Anwendungsbeispiel	103
6.1	Experimentelle Verifizierung der Simulation des Schweißprozesses.....	104
6.1.1	Thermische Analyse eines Überlappstoßes.....	104
6.1.2	Thermomechanische Analyse einer Blindnaht.....	108
6.1.3	Thermomechanische Analyse eines Aluminiumprofils	111
6.2	Anwendungsbeispiel: Motorträger	113
6.2.1	Experimentelle Ermittlung der Schwingfestigkeit	114
6.2.2	Thermomechanische Analyse der Schweißnaht.....	115
6.2.3	Mechanische Analyse des Lastfalles	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
8	Literatur	121

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Forderung der Märkte nach immer kürzeren Produktzyklen bei gleichzeitig steigender Qualität und möglichst reduzierten Kosten ist heute allgegenwärtig. Gerade für die Hochlohnländer wie Deutschland ist dabei Innovation und deren schnelle Umsetzung bei Produkten und Produktionsprozessen zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor geworden (*Milberg 1997*). Die Produktentwicklung muss massiv beschleunigt werden, neue Fertigungsverfahren wie die Lasermaterialbearbeitung müssen schnell in die Produktion integriert werden (*Reinhart 1997*).

Wichtigste Maßnahme zur Verkürzung der Produkterstellung ist die organisatorische und informationstechnische Integration der verschiedenen Arbeitsbereiche auf dem Weg von der Produktidee zum fertigen Produkt. Insbesondere Produktentwicklung und Produktionsplanung werden durch Maßnahmen des Simultaneous oder Concurrent Engineering eng miteinander verknüpft (*Eversheim u. a. 1995*) (Bild 1.1). Durch die Parallelisierung der Aufgaben wird dabei ein deutlicher Zeitgewinn erzielt. Gleichzeitig können Produkt und Produktion frühzeitig aufeinander abgestimmt werden, die Planungsqualität wird verbessert, Fehler werden vermieden und so insgesamt die Kosten verringert.

Neben den organisatorischen Maßnahmen nehmen rechnergestützte Hilfsmittel in der Produktentwicklung heute eine entscheidende Rolle ein (*Spur & Krause 1997, Murr 1999*). So wird bereits eine Vielzahl von Produkteigenschaften am virtuellen Produktmodell untersucht und optimiert (*Reinhart & Praun 1998*). Dabei wird zunehmend auch versucht, die Fertigungsprozesse virtuell abzubilden. Ziel ist es, einerseits die Prozesse parallel zum Produkt zu einem hohen Reifegrad zu entwickeln und andererseits die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prozess frühzeitig untersuchen zu können (*Reinhart 2000*). Das gilt in besonderem Maße für neue Fertigungsverfahren wie dem

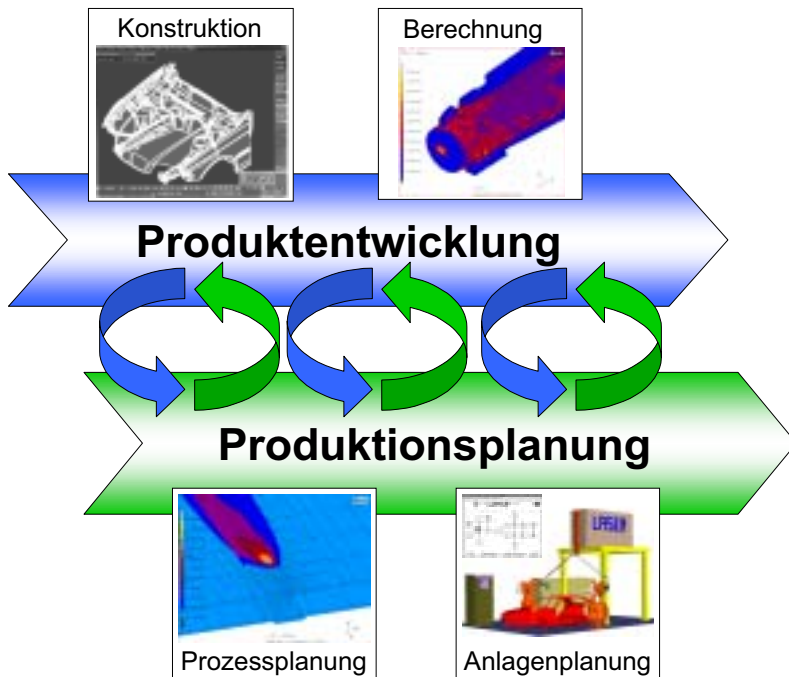


Bild 1.1: Verkürzung der Produkterstellung durch integrierte Produktentwicklung und Produktionsplanung mit rechnergestützten Werkzeugen

Laserschweißen¹, bei denen der Anwender nicht auf eine langjährige Erfahrungsbasis zurückgreifen kann. In der Automobilindustrie wird bereits gefordert, dass in Zukunft nur noch Fertigungsprozesse eingesetzt werden, die durch Simulation abgesichert wurden (Flegel 1999).

Als innovative Verbindungstechnik eröffnet das Laserschweißen eine Vielzahl neuer konstruktiver Möglichkeiten für die Bauteilgestaltung, insbesondere im Bereich des Leichtbaus. Die geringe Wärmeeinbringung oder die Möglichkeit

¹ zu Gunsten einer besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit in der Regel der Begriff Laserschweißen an Stelle des Begriffs Laserstrahlschweißen (nach DIN 1910 Teil 2) verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.1).

zum Fügen bei einseitiger Zugänglichkeit, aber auch die Anwendbarkeit auf eine große Anzahl von Werkstoffen und Werkstoffkombinationen sind nur einige der Vorzüge der Lasertechnologie (*Dilthey 2000*). Als Hemmnisse für den Einsatz des Lasers erweisen sich die hohen produktionstechnischen Anforderungen und die hohen Investitionskosten. Um den Laser technisch und wirtschaftlich interessant einzusetzen, sind daher einerseits die konstruktiven Möglichkeiten des Laserschweißens konsequent zu nutzen und andererseits die spezifischen Anforderungen beispielsweise an die Fertigungstoleranzen durch geeignete Maßnahmen in der Konstruktion zu berücksichtigen.

Für die fertigungsgerechte Konstruktion bei der Lasermaterialbearbeitung wurden daher in bisherigen Forschungsvorhaben bereits eine Reihe von Konstruktionsrichtlinien erstellt (*Radaj u. a. 1994, Zopf 1995*). Gerade bei der Vielzahl möglicher Anwendungsfälle mit unterschiedlichsten Bauteilgeometrien können diese Richtlinien jedoch nicht ohne weiteres allgemeingültig verwendet werden, da beispielsweise die Bauteilbelastung besonders bei komplexen Geometrien nur schwer abzuschätzen ist und je nach Anwendung stark differieren kann. Hier verspricht die Unterstützung der Konstruktion und Fertigungsplanung durch geeignete Simulationen des Schweißprozesses bzw. des Lastfalles eine deutliche Verbesserung im Sinne einer belastungs- und fertigungsgerechten Konstruktion. Ansätze für solche Simulationen von Schweißverbindungen steht jedoch erst am Anfang der industriellen Nutzung (*Radaj 1999*).

1.2 Zielsetzung und Eingrenzung

Die integrierte Produktentwicklung und der zunehmende Einsatz von digitalen an Stelle von physischen Prototypen bedeuten, dass Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigungsprozess in Zukunft zunehmend in einer digitalen Umgebung untersucht und optimiert werden. In diesem Umfeld ist das Ziel dieser Arbeit, die integrierte Entwicklung von Produkt und Fertigungsprozess durch geeignete Simulationen² zu unterstützen. Die

² "Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind" (*VDI-Richtlinie 3633*; vgl. Abschnitt 2.4).



Bild 1.2: Untersuchung des Einflusses des Fertigungsprozesses auf die Produkteigenschaften durch Simulation von Schweißprozess und Lastfall

Simulationen sollen es ermöglichen, die wesentlichen Eigenschaften der Schweißnaht zu ermitteln und die Auswirkungen des Fügeprozesses auf die konstruktiven Eigenschaften des Bauteils zu untersuchen. Die zu entwickelnde Methode wird am Beispiel des Laserschweißprozesses umgesetzt, da das Erfahrungswissen zu diesem innovativen Prozess in der Konstruktion noch vergleichsweise gering ist und daher eine Simulation hier einen besonderen Nutzen verspricht.

Um die Eigenschaften der Schweißnaht zu ermitteln soll zunächst eine Simulation des Laserschweißprozesses erarbeitet werden (Bild 1.2), die sowohl Aussagen zu den mikroskopischen Eigenschaften der Schweißnaht, wie beispielsweise der Nahtgeometrie, aber auch zu den makroskopischen Eigenschaften, wie beispielsweise den resultierenden Eigenspannungen, ermöglicht. Anschließend sollen mit einer Simulation von Lastfällen die resultierenden mechanischen Eigenschaften, zum Beispiel die Steifigkeit oder Bauteilfestigkeit, unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Schweißnähte untersucht werden. Im Mittelpunkt der Arbeit steht dabei nicht die Entwicklung neuer Modelle für die einzelnen physikalischen Phänomene des Schweißprozesses oder des Bauteilversagens. Vielmehr geht es um die Integration verschiedener Modelle im Sinne der Zielsetzung.

Um den effektiven Einsatz der Berechnungsverfahren zu ermöglichen, sollen Hilfsmittel zur schnellen Modellerstellung und Auswertung zur Verfügung gestellt werden. Gleichzeitig sind die Modelle so offen zu gestalten, dass damit unterschiedliche Werkstoffe wie beispielsweise verschiedene Stahl- oder Aluminiumlegierungen berechnet werden können. Auch soll es prinzipiell möglich sein, durch Ergänzung von weiteren Teilmodellen andere, konkurrierende Fertigungstechnologien, wie zum Beispiel das Elektronenstrahlschweißen, zu untersuchen und zu bewerten.

Mit Hilfe der Simulationen kann eine wesentlich größere Vielfalt an Konstruktionsvarianten mit unterschiedlichen Nahtformen untersucht und bewertet werden. Der Aufwand für experimentelle Untersuchungen wird entscheidend reduziert, was gerade für die Wirtschaftlichkeit der Lasermaterialbearbeitung von besonderer Bedeutung ist. Andererseits wird eine bessere, zielgerichtete Entwicklungsarbeit bei höherer Planungssicherheit und wesentlich verkürzten Entwicklungszeiten ermöglicht. Es können Konstruktionen im Sinne einer fertigungs-, werkstoff- und belastungsgerechten Gestaltung entwickelt werden, die dem Fertigungsverfahren Laserschweißen optimal angepasst sind.

1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit ist in Bild 1.3 dargestellt. Ausgehend von wesentlichen Grundbegriffen und Definitionen zum Laserschweißprozess und zur Produkterstellung wird in Kapitel 2 zunächst der Stand der Technik bei der Auslegung und Berechnung von lasergeschweißten Bauteilen beleuchtet. Dabei werden auch unterschiedliche Ansätze zur Simulation von Schweißverbindungen diskutiert und Defizite aufgezeigt.

Ausgehend von den in Kapitel 2 formulierten Randbedingungen und Defiziten werden in Kapitel 3 die wesentlichen Einflussgrößen und Wechselwirkungen bei der Berechnung von Laserschweißverbindungen diskutiert und die Anforderungen an eine Modellierung der Fügeverbindungen abgeleitet. Darauf aufbauend wird eine Methode zur Ermittlung der Eigenschaften lasergeschweißter Bauteile entwickelt.

Die zur Umsetzung der Methode notwendigen Modelle zur Beschreibung der physikalischen Phänomene des Schweißprozesses werden in Abschnitt 4.1

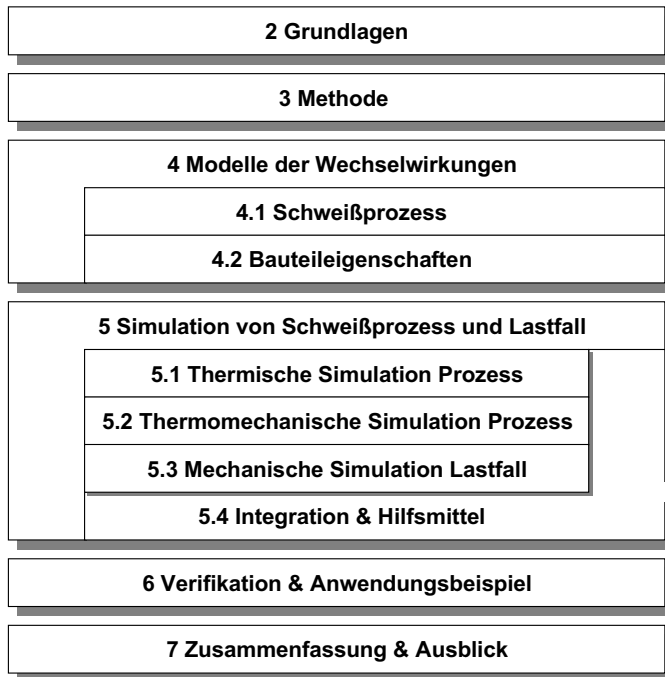


Bild 1.3: Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

beschrieben. Die Wechselwirkungen der resultierenden Nahteigenschaften mit den Bauteileigenschaften werden in Abschnitt 4.2 diskutiert. Kapitel 4 bildet damit die Grundlage zur Simulation des Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung des Fertigungseinflusses.

In Kapitel 5 wird die entwickelte Methode mit den wesentlichen Komponenten vorgestellt und eingehend beschrieben:

Die thermische und thermomechanische Simulation des Laserschweißprozesses werden in Abschnitt 5.1 und 5.2 dargestellt. Dabei werden die in Kapitel 4 beschriebenen physikalischen Mechanismen des Schweißprozesses in Simulationsmodelle umgesetzt mit dem Ziel, die formulierten wesentlichen Nahteigenschaften zu ermitteln.

In Abschnitt 5.3 wird die mechanische Simulation des Lastfalles dargestellt. Die zuvor ermittelten Nahteigenschaften werden dabei in geeigneter Form berücksichtigt. Als Ergebnis erhält der Anwender die resultierenden mechanisch technologischen Eigenschaften des lasergeschweißten Bauteils.

Um einen effizienten Einsatz der Simulationen zu gewährleisten ist es notwendig, die Ergebnisse zwischen den einzelnen Simulationsschritten durch geeignete Schnittstellen austauschen zu können. Hinzu kommen Hilfsmittel zur Modellerstellung und Auswertung, die in Abschnitt 5.4 beschrieben werden.

In Kapitel 6 werden die zuvor beschriebenen Simulationsmodelle an konkreten Anwendungsbeispielen illustriert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit abschließend zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Ansätze, die auf der entwickelten Methode aufbauen.