

Die Herstellung metallischer Bauteile bzw. Werkzeugeinsätze mit Hilfe des neuen Rapid-Prototyping Verfahren ProMetal 3D-Printing

Dr.-Ing. Dirk Godlinski

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik
und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Wiener Str. 12, D-28359 Bremen, Germany
Tel: +49 421 2246-0, Fax: +49 421 2246-300
E-Mail: dg@ifam.fraunhofer.de

1 Einleitung

Die Anwendung von Rapid Prototyping Verfahren nimmt heutzutage einen wichtigen Stellenwert in der gesamten Produktentwicklungskette ein. Während eine Reihe von Technologien zur Herstellung von Konzeptmodellen bereits zur Verfügung steht, weisen nur wenige generative Verfahren das Potenzial zur Fertigung von hochqualitativen und metallischen Bauteilen auf, die als prototypische oder Serienwerkzeuge eingesetzt werden können. Das auf einem MIT-Patent beruhende 3-Dimensional Printing (3DP) Verfahren ProMetal bietet besonders gute Voraussetzungen zur Herstellung von metallischen Werkstücken für den Einsatz im Rapid Tooling Bereich. In diesem Beitrag wird am Beispiel des kommerziell verfügbaren System ProMetal RTS-300 (**Bild 1**) der Prozess des 3DP erläutert und Verfahrensprinzipien sowie potenzielle Anwendungsgebiete dargestellt und diskutiert. Weiterhin wird ein Ausblick auf aktuelle und zukünftige Weiterentwicklungen der Technologie gegeben.



Bild 1:
ProMetal 3D-Printing
Anlage RTS-300 (Bau-
raum 300x300x250 mm³)

2 Der Prozess

Der 3DP Prozess (**Bild 2**) beruht auf dem generativen Schichtenaufbau unter Verwendung eines Pulverwerkstoffes und Bindersystems. Im Bauprozess wird zunächst eine dünne Lage Pulver auf einer Pulverplattform abgelegt [1]. Ein Computermodell des Bauteils wird an einen Schichtgenerator zur Berechnung der einzelnen Schichtinformationen übergeben. Ein Druckkopf sprüht – analog dem Tintenstrahl-druckprinzip – ein Bindersystem auf die Pulverpartikel, die das spätere Bauteil formen sollen. Mittels einer Wärmequelle wird der Binder getrocknet und die Pulverpartikel miteinander verbunden. Anschließend wird die Bauplattform abgesenkt, so dass eine neue dünne Lage Pulver aufgebracht werden kann. Dieser schichtweise Aufbau wiederholt sich solange, bis das Teil vollständig gefertigt wurde. Das Bauteil kann aus dem Pulverbett entnommen und überschüssiges Pulver entfernt werden.

Eine 3DP-Maschine besteht aus einem Steuerrechner, Schrittmotoren für einen X-Y-Tisch, einem Pulverzylinder, der in Z-Richtung verfahren wird und damit die Schichthöhe der einzelnen Pulverlage bestimmt sowie einer Binderzuführung zu einem Druckkopf. Die Druckgeschwindigkeit wird über eine schnelle (1,5 m/s) Rasterbewegung entlang der Y-Achse bestimmt, wobei die Bindertropfen entlang der X-Achse auf die Pulverpartikel aufgesprüht werden. Der Düsendurchmesser beträgt 46 µm. Der kontinuierliche Binderstrom wird mittels eines schwingenden (60 kHz) Piezoelements unterbrochen, wodurch einzelne Bindertropfen mit einem Durchmesser von 80 µm entstehen. Jeder Bindertropfen passiert ein elektrostatisches Feld. Die Ladung, die der Bindertropfen dabei erhält, wird ausgenutzt, um eine akkurate Platzierung des Tropfens auf dem Pulverbett zu gewährleisten [2]. Die vertikale Geschwindigkeit, mit der ein Bindertropfen auf die Pulverpartikel auftrifft, beträgt etwa 10 m/s.

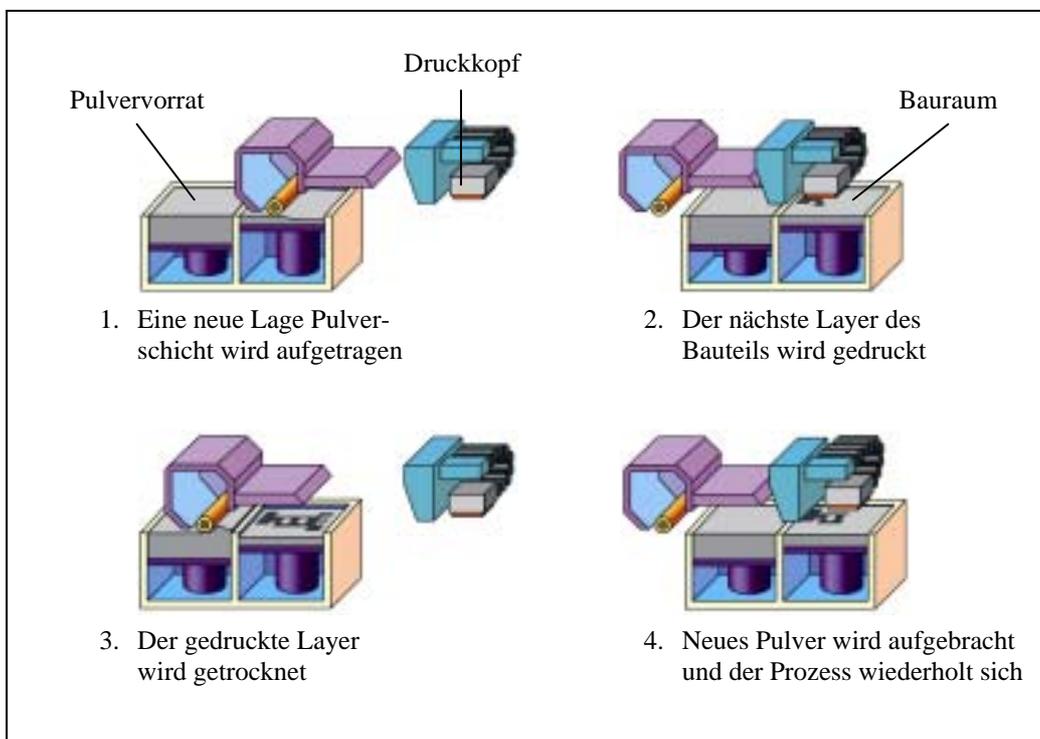


Bild 2: Schematische Darstellung des ProMetal 3D-Printing Prozesses

3 Das Verfahrensprinzip

Die 3DP Technologie ProMetal zur Herstellung eines Metallbauteiles mit Hilfe eines Strahldruckers basiert auf dem schichtweisen Druckprozess mit adhesiver Bindung der Metallpulverpartikel. Die Packungsdichte der Pulverpartikel im losen Pulverbett hat dabei entscheidende Auswirkungen einerseits auf die Qualität der Verbindung einzelner Pulverpartikel untereinander und der aufeinanderfolgenden Pulverschichten andererseits. Es werden ähnliche Packungsdichten wie beim Selektiven Lasersintern erreicht, die zwischen 50 und 62 % betragen [3]. Trifft der Bindertropfen auf das Pulverbett auf, formt sich ein Gemisch aus Binderflüssigkeit und Pulverpartikeln. Die in einem porösen System bestehenden Kapillarkräfte bewirken eine Weiterleitung der Binderflüssigkeit in angrenzende Bereiche, wodurch auch die Verbindung zur vorherigen Schicht hergestellt wird. Im ProMetal Prozess beträgt die Dicke aufeinanderfolgender Pulverschichten ca. 120 – 170 µm. Nach dem Verdunsten des wässrigen Binderanteils besteht eine Pulverschicht aus 60 Volumen-% aus Metallpulver und aus 10 Volumen-% organischen Binder. Das entstandene Netzwerk aus verfestigten Pulverpartikeln ergibt am Ende des Bauprozesses ein sogenanntes „Grünteil“. Die mechanischen Eigenschaften im porösen Grünteilzustand sind relativ gering. Das Bauteil ist fragil, besitzt aber genügend Festigkeit, um einem anschließendem Sinterprozess zugeführt zu werden.

Aufgabe der Sinterung ist es, das „Grünteil“ in einen Zustand hoher Festigkeit und/oder hoher Dichte zu überführen. Die Temperaturführung im Sinterzyklus wird so gewählt, dass eine vollständige Entbinderung, d. h. die Entfernung der organischen Binderkomponente aus dem porösen Bauteil, bei relativ niedrigen Temperaturen erfolgt. Bei höheren Temperaturen erfolgt dann die Sinterung auf 60% der theoretischen Dichte des Werkstoffes. In dem zeit- und temperaturgesteuerten Prozess kommt es durch Sinterhalsbildung und Materialumlagerungsvorgänge zur Verbindung der Pulverpartikel untereinander, die dem Bauteil eine ausreichend hohe Festigkeit verleiht. Der durch die Verdichtung der Pulverpartikel hervorgerufene reproduzierbare Bauteilschwund beträgt dabei nur ca. 1,5 % (z. B. beim Werkstoffpulversystem Edelstahl). Durch einen nachfolgenden Infiltrationsprozess bei einer Temperatur von 1100 °C mit einer Bronzelegierung kann die Restporosität geschlossen werden. Das Bauteil weist dann 100 % Dichte auf. Die Eigenschaften der bisher eingesetzten Werkstoffe sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Werkstoffeigenschaften		Edelstahl 316+Bronze	Edelstahl 420+Bronze
physikalisch	Dichte	8,10 g/cm ³	8,07 g/cm ³
mechanisch	Härte	60 HRB	26 – 30 HRC
	Zugfestigkeit	407 MPa	682 MPa
	Streckgrenze	234 MPa	455 MPa
	Elastizitätsmodul	148 GPa	147 GPa
	Dehnung	8,0 %	2,3 %
thermisch	Leitfähigkeit	80 W/mK	85 W/mK
	Wärmeausdehnungskoeffizient	8,3 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	7,2 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Spezifische Wärme	0,4 kJ/kgK	0,46 kJ/kgK

Tabelle 1: Verfügbare Werkstoffe und deren Eigenschaften im ProMetal Prozess

Das Gefüge infiltrierter Strukturen besteht aus 60 % Edelstahl und 40 % Bronzelegierung 90/10 Kupfer/Zinn. Die Partikelgröße des verwendeten Edelstahlpulvers beträgt ca. 60 – 80 µm.

Der Prozessablauf des 3DP soll beispielhaft an Bauteilen der in **Bild 3** dargestellten Windkanalmodelle beschrieben werden. Die Abmessungen der Teile betragen ca. 170 mm x 65 mm x 87 mm. Es ist ersichtlich, dass es sich hierbei um komplexe Strukturen mit feinen Details, Überhängen und Hinterschnitten handelt. Solche Bauteilmerkmale lassen sich mit dem 3DP Verfahren problemlos herstellen, da ein Abstützen der Strukturen durch das Pulverbett erfolgt. Spezielle Stützgeometrien bzw. Supports, die z. B. beim Direkten Metall Lasersintern aufgrund der auftretenden thermischen Spannungen erforderlich sind, werden hierbei nicht benötigt.



Bild 3: Komplexe Werkstücke am Beispiel von Triebwerksadaptern für Windkanalmodelle (Design: Airbus Deutschland GmbH, Foto: Gebhardt)

Der Druckprozess dauerte bei gleichzeitiger Fertigung der zweier Modelle insgesamt 13 Stunden. Die anschließende Sinterung sowie die Infiltration mit Bronze dauerten jeweils 11 Stunden. Der durch die Sinterung hervorgerufene Bauteilschwund beträgt 1,2 % bei dem verwendeten 60 % Edelstahl 316L – 40 % Bronze-Gemisch. Die Härte wurde mit 30 HRC gemessen, wodurch sich das Teil sowohl spanend als auch funkenerosiv nachbearbeiten ließe.

4 Die Anwendungen

Der ProMetal 3DP Prozess kann überall da eingesetzt werden, wo voll funktionsfähige metallische Bauteile direkt aus einem 3D CAD Datensatz innerhalb von wenigen Tagen anstatt von Wochen oder gar Monaten hergestellt werden sollen. Dabei stellen solche Bauteilmerkmale wie unbegrenzte Designflexibilität, komplexe interne Strukturen, Überhänge und Hinterschnitte die besonderen Vorteile des Verfahrens heraus. Die Palette der derzeit möglichen Anwendungen reicht uneingeschränkt von metallischen Funktionsprototypen über die direkte Fertigung von komplexen Bauteilen geringer Losgröße bis hin zur Herstellung von Werkzeugformeinsätzen. Diese Werkzeugformeinsätze sind insbesondere im Kunststoffspritzguss-Formenbau, für Me-

tall-Druckgussformen mit kurzen Laufzeiten, PET-Blasformen oder für Extrudierwerkzeuge geeignet. Im **Bild 4** werden Beispiele von Werkzeugformen gezeigt, die mittels 3D Printing hergestellt wurden.



Bild 4:

Anwendung des 3D Printing im Formenbau für den Kunststoffspritzguss

Speziell im Formenbau für den Kunststoffspritzguss stellt sich das besondere Potenzial des ProMetal Verfahrens dar. Die Konstrukteure von Werkzeugen sind nun in der Lage, interne Kühlkanäle vorzusehen, die einen konturnahen Verlauf aufweisen (*conformal cooling*) und daher mit konventionellen Technologien bisher nicht zu fertigen waren. Solche konturnahen Kühlkanäle gewährleisten eine gleichmäßige Wärmeverteilung in beiden Formhälften während des Spritzgussvorganges [4-6]. Aufgrund der Designfreiheit beim Druckprozess kann die Gestaltung der Kühlkanäle so vorgenommen werden, dass gezielte Turbulenzen (siehe **Bild 5**) einen erhöhten Wärmeübergang zur Folge haben. Dabei wird ein verbessertes Temperaturmanagement durch eine verringerte interne Masse bei Werkzeugkernen erzielt. Das Ziel der optimalen Wärmeübertragung kann bereits während der Werkzeugkonstruktion durch eine begleitende Simulationsrechnung des Spritzgussvorganges verifiziert werden. Das Ergebnis bestimmt dann den Verlauf der Kühlkanäle im Werkstück.

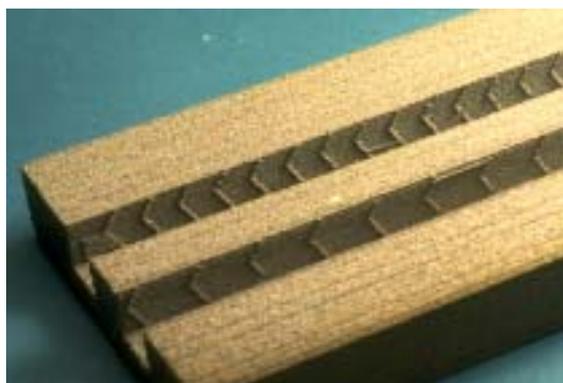


Bild 5:

Beispiel oberflächenstrukturierter Kühlkanäle für gezielt eingebrachte Turbulenzen

Conformal cooling wirkt sich einerseits direkt auf den Spritzgussvorgang aus, indem es zu einer Reduzierung der Zykluszeit und damit zur Erhöhung der Produktivität durch kürzere Taktzeiten beitragen kann. Andererseits führt eine homogene Werkzeugkühlung zu einer gleichmäßigeren Abkühlung des Spritzgussbauteils, wodurch innere Spannungen im Material verringert werden. Konkrete Leistungsvergleiche haben gezeigt, dass die Anwendung von *conformal cooling* bei einem Spritzgusskern die Zykluszeit um 50 % verringern kann.

5 Neue Entwicklungen

Aktuelle Neuentwicklungen beim 3DP beziehen sich einerseits auf die Modifizierung des Anlagenkonzepts und andererseits auf die Entwicklung neuer Werkstoffe mit anwendungsspezifischen Eigenschaften.

Seit kurzem existiert eine Anlage R 10, die zu einem Hochgeschwindigkeitsdruckprozess führt. Der dazu notwendige schnelle Materialaufbau wird durch eine größere Anzahl an parallel eingesetzten Druckdüsen sowie der damit verbundenen Vergrößerung des Arbeitsraumes auf 1000 mm x 500 mm x 250 mm erreicht. Beim Sprühprozess können die einzelnen Bindertropfen gezielt ausgelenkt werden, so dass ein größeres Volumen an Pulverpartikeln gleichzeitig benetzt werden kann. Der bisherige Schritt der Trocknung des Pulverbetts nach dem Sprühvorgang ist durch ein neues Bindersystem eliminiert worden. Die Produktionsrate würde durch das Hochgeschwindigkeitsdrucken dann von derzeit 12 Werkstücken (Abmessungen 120 mm x 120 mm x 80 mm) pro Woche auf 100 Werkstücke gleicher Dimension pro Woche steigen.

Eine Weiterentwicklung des bestehenden Druckkopfes wird das Aufsprühen zweier unterschiedlicher Bindersysteme gleichzeitig ermöglichen (**Bild 6**). Dadurch können auf definierte Bereiche des Pulverbetts verschiedene Materialien eingebracht werden, die gezielt die Werkstoffeigenschaften des Pulversystems beeinflussen. Diese lokale Materialkontrolle kann dann ausgenutzt werden, um solche Eigenschaften wie Härte, Porosität und Dichte oder thermische Eigenschaften innerhalb des Werkstückes zu verändern.

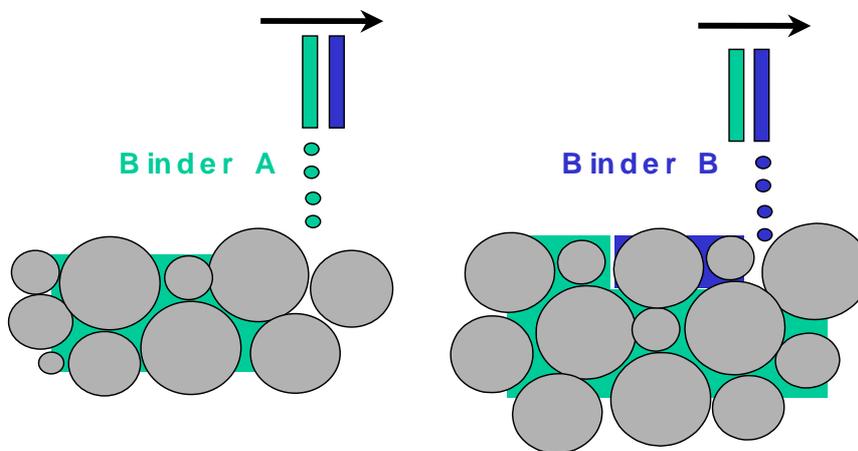


Bild 6: Lokale Materialkontrolle durch Drucken unterschiedlicher Bindersysteme

Im **Bild 7** wird am Beispiel einer Führung dargestellt, wie durch eine Veränderung der Materialzusammensetzung im Kantenbereich das Verschleißverhalten durch eine Aufhärtung verbessert wird. Dazu wird zunächst pro Schicht das Standardbindersystem aufgesprüht, wodurch es zu einer allgemeinen Verfestigung der losen Metallpulverpartikel kommt. Handelt es sich bei diesem Pulversystem um ein Stahlpulver, kann durch einen darauf folgenden Druckprozess eines zweiten Bindersystems mit suspendierten Kohlenstoffpartikeln ein Auflegieren des Pul-

versystems erfolgen. Ein erhöhter Kohlenstoffgehalt im Stahl bewirkt einen Anstieg der mechanischen Eigenschaften bezüglich Festigkeit und Härte. Wird dieses Auflegieren so gesteuert, dass selektiv der Randbereich des Bauteils bedruckt wurde, kann dort die Verschleißfestigkeit erhöht werden. Gleichzeitig wird im Mittenbereich auf die Auflegierung verzichtet, um eine ausreichend hohe Zähigkeit im Kern des Bauteils zu erzielen.

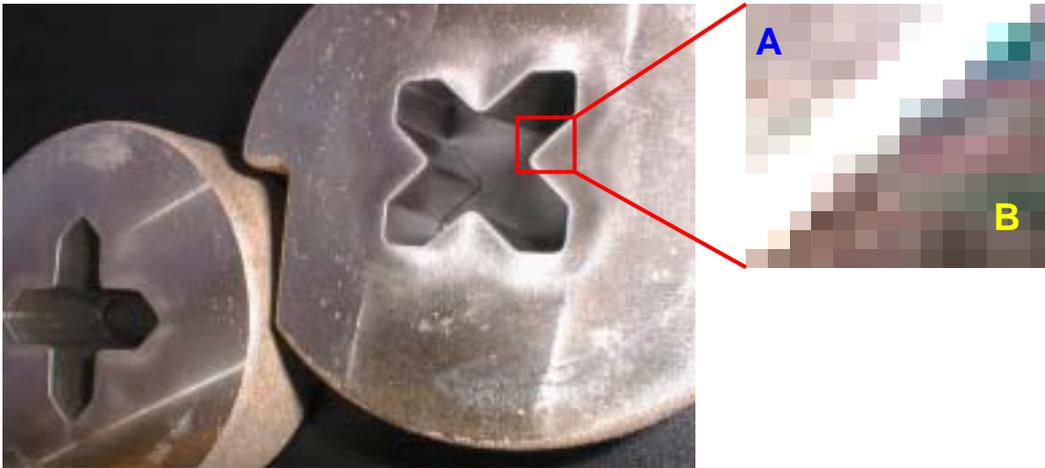


Bild 7: Veränderung der Materialzusammensetzung im Kantenbereich zur lokalen Erhöhung der Verschleißfestigkeit

6 Zusammenfassung

Beim 3DP handelt es sich um einen computergesteuerten Herstellungsprozess eines Werkstückes, wobei ein CAD-Modell direkt dreidimensional in Schichten "gedruckt" wird. Es können prinzipiell alle pulverförmigen Materialien und eine Vielfalt an flüssigen Bindern verwendet werden. Das ProMetal 3DP Verfahren ist besonders geeignet für die schnelle Fertigung von metallischen Bauteilen für den Einsatz im Rapid Tooling oder Rapid Manufacturing Bereich. Durch die Designfreiheit kann eine freie Wahl der Außen- und Innengeometrie durch den Konstrukteur erfolgen. Komplexe Strukturen mit Überhängen, Hinterschneidungen und Hohlräumen lassen sich realisieren, indem das ungebundene Metallpulver als Stütze dient. Beispielsweise verbessert die Integration von konturnahen Kühlkanälen in Werkzeugformen, deren bisherige Fertigung auf konventionellem Wege nicht möglich war, einerseits die Produktqualität und verringert andererseits die Taktzeiten, z. B. im Kunststoffspritzguss. Verschiedene Materialien auf Edelstahlbasis stehen für das ProMetal Verfahren kommerziell zur Verfügung. Deren Eigenschaften (z. B. Härte, Dichte) im Werkstück lassen sich durch gezielte Veränderungen des Bindersystems variieren. Das Verfahren bietet darüber hinaus ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Arbeitsgeschwindigkeit (Hochgeschwindigkeitsdrucken, Skalierung des Bauraums) bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit von 3DP Bauteilen.

Literatur

- [1] Michaels, S.; Sachs, E.M.; Cima, M.J. Metal parts generation by three dimensional printing, *Proceedings of the Fourth International Conference on Rapid Prototyping*, 1993.
- [2] Rapid Prototyping Report. Conference highlights: Three-dimensional printing, 4(7), CAD/CAM Publishing Inc., July, 1994, S. 3 – 4.
- [3] Sun, M.S.M.; Nelson, J.C.; Beaman, J.J.; Barlow, J.J. A model for partial viscous sintering, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, Austin, USA, 1991.
- [4] Janczyk, R., McLaughlin, R. and McCarthy, S.P. Rapid Stereolithography Tooling for Injection Moulding: The Effect of Cooling Channel Geometry, *Journal of Injection Moulding Technology*, März 1997, Vol 1 No.1, S. 72 – 78
- [5] Sachs, E., Allen, S., Guo, H., Bano, J., Cima, M., Serdy, J. and Brancazio, D., Progress on Tooling by 3D Printing: Conformal Cooling, Dimensional Control, Surface Finish and Hardness, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, Austin, USA, 1997, S. 115-124.
- [6] Xu, X, Sachs, E. Allen, S and Cima, M., Designing Conformal Cooling Channels for Tooling, *Proceedings from the Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, Austin, USA, 1998, S. 131-146.