

Kapitel 1

Einleitung

Mitte der achtziger Jahre wurde durch die Entwicklung der lasergestützten Rapid Prototyping Verfahren eine neue Technologie etabliert, die viele Bereiche der Fertigung zunächst in der Prototypenherstellung, inzwischen auch in der Werkzeugherstellung (Rapid Tooling) und der Kleinserienfertigung (Rapid Manufacturing) verändert hat. Mittels der Lasergenerierverfahren¹ ist es möglich, binnen weniger Stunden schichtweise ein komplexes, dreidimensionales Modell aus einem 3D-CAD-Datensatz herzustellen. Da der Faktor „Zeit“ im Zieldreieck der schnellen Produktentwicklung bei hoher Qualität und kostengünstiger Herstellung immer wichtiger wird und über die Wettbewerbsfähigkeit eines neuen Produktes die Entwicklungszeit bis zur Markteinführung mitentscheidet, besteht der Bedarf an einer schnellen Modellerstellung. Dabei sind heute nicht mehr nur die über Stereolithographie aus flüssigem Kunststoff hergestellten Anschauungs- und Kommunikationsmodelle relevant. Ziel der Entwicklung neuer Verfahren ist vor allem die Erstellung von Funktionsmodellen mit seriennahen Eigenschaftsprofilen. Hier zeigt sich das hohe Potential der Lasergenerierverfahren, die aus pulverförmigen Werkstoffen komplexe Geometrien in einem Herstellungsschritt erzeugen. Zusätzlich ermöglicht die direkte Verwendung des 3D-CAD-Modells einen hohen Automatisierungsgrad sowohl bei der Datenaufbereitung als auch im eigentlichen Bauprozess mit den entsprechenden anlagentechnischen Möglichkeiten.

Das später unter dem Handelsnamen „Selective Laser Sintering (SLS)“ vertriebene Verfahren der generativen Fertigung von Bauteilen aus Pulverwerkstoffen mittels Laserstrahlung ist erstmals von Carl Deckard 1986 [Dec88] veröffentlicht worden, wenn auch in Europa, Japan und Amerika schon erste grundlegende Arbeiten in den siebziger Jahren vorgestellt wurden [Cir72] [Hou81] [Wil97]. Zu Beginn der Entwicklung sind Thermoplastpulver verarbeitet worden, erst 1996 ist der erste Prozess für Metallpulver kommerziell verfügbar. Die Akzeptanz dieses Verfahrens ist zurzeit in der Industrie noch

¹Zur Abgrenzung der Begriffe Lasergenerieren, Lasersintern, Laserschmelzen und Laserformen s. Kap. 2.1.1.

stark eingeschränkt. Zum einen ist dies darin begründet, dass ein Informationsdefizit bezüglich der Vorteile des Einsatzes vorliegt, zum anderen erreichen die gefertigten Metallbauteile häufig die Qualitätsanforderungen nicht oder nur unzureichend. Eine Ursache hierfür ist die Tatsache, dass verstärkt Werkstoffe zum Einsatz kommen, die speziell für den Prozess optimiert und nicht an das Einsatzgebiet angepasst worden sind oder werden können. Durch die Entwicklungen der letzten Jahre wurden zunehmend weitere Werkstoffe oder Werkstoffsysteme für den Lasergenerierprozess qualifiziert. Mit der Verwendung von Lasern hoher Strahlqualität wie z.B. Faserlasern sind mittlerweile auch Edelstahlpulver und Titanwerkstoffe verarbeitbar.

Neben der Verbesserung der Bauteilqualität ist auch die Erweiterung der zur Verfügung stehenden Materialpalette ein wichtiger Baustein, um die Akzeptanz und industrielle Umsetzung des Verfahrens zu erhöhen. Prozesswissen, das aus der Untersuchung und der Erfahrung mit einzelnen Werkstoffen gewonnen wurde, lässt sich aufgrund der komplexen Material-Laser-Wechselwirkung nur eingeschränkt auf andere Werkstoffe übertragen. Häufig sind aufwändige empirische Untersuchungen die einzige Möglichkeit, eine geeignete Prozessstrategie zu entwickeln, die anschließend hinsichtlich der Qualitätsanforderungen wie Bauteildichte, Härte oder Oberflächenbeschaffenheit zu optimieren ist. Eine Werkstoffentwicklung für den Lasergenerierprozess ist zeit- und kostenaufwändig, da bisher entwickelte Prozesssimulationen nur eine unzureichende Vorhersage geeigneter Prozessparameter ermöglichen.

Zur Entwicklung neuer Werkstoffsysteme für den Lasergenerierprozess ist es daher erforderlich, die verfahrenstechnischen, werkstoffkundlichen und physikalischen Grundlagen des Prozesses zu erarbeiten, um mit diesen eine geeignete Prozessmodellierung zu entwickeln, die es ermöglicht, den experimentellen Versuchsaufwand zur Qualifizierung von neuen Werkstoffen zu minimieren. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Ziel der im Folgenden vorgestellten theoretischen und experimentellen Werkstoffentwicklung für den Lasergenerierprozess ist es, einen Metall-Keramik-Verbundwerkstoff zur Verfügung zu stellen, der sowohl die Erzeugung von Funktionsschichten auf Stahlbauteilen als auch den kompletten Aufbau von Bauteilen mittels einer kommerziell verfügbaren Lasergenerieranlage ermöglicht.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Lasergenerieren

2.1.1 Begrifflichkeiten und Einordnung des Verfahrens

Mit dem Begriff Lasergenerieren werden im Rahmen dieser Arbeit alle lasergestützten urformenden Verfahren zusammengefasst, vgl. Abb. 2.1 [Emm04]. Nach DIN 8580 ist unter Urformen das Fertigen eines festen Körpers durch Schaffen eines Zusammenhaltes aus einem formlosen Stoff zu verstehen. Dieser formlose Stoff kann sowohl flüssig, fest (pulverförmig) als auch gasförmig vorliegen. Im Unterschied hierzu verwendet Beyer den Begriff Lasergenerieren nur für Verfahren, bei denen die Energie durch den Laserstrahl und der Werkstoff (Metallpulver oder Metalldraht) simultan zugeführt werden. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen urformenden Fertigungsprozess mittels Laserstrahlung, allerdings erfolgt die Werkstoffzufuhr nicht durch die komplette Vorlage einer Materialschicht. Für diesen Prozess findet sich in der Literatur auch häufig der Begriff Auftragsschweißen. [BW98] [Geb00] Die Verfahren der Stereolithographie (Urformen aus dem flüssigen Zustand) und die Laser Chemical Vapor Deposition (Urformen aus dem gasförmigen Zustand) werden nicht weiter betrachtet, da die Ausgangsbasis der hier durchgeführten Untersuchungen pulverförmige Werkstoffe sind.

Erste Untersuchungen zum Lasergenerieren von Kunststoffpulvern sind 1988 von Deckard veröffentlicht worden [Dec88], die erste kommerzielle Anlage ist 1992 von der DTM Corp. vorgestellt worden. Im Rahmen der Forschungsarbeiten an der University of Texas in Austin sind weitere Werkstoffsysteme untersucht worden, kommerzialisiert wurden aber zunächst eine Reihe von Thermoplasten. Durch die Verwendung von polymerummantelten Metallpulvern hat sich ein Prozess entwickelt, der über ein zweistufiges Verfahren auch Metallbauteile im Lasergenerierprozess erzeugt. Das Verfahren der DTM Corp. wird als „selective laser sintering“ vertrieben, und im deutschsprachigen Bereich als „Selektives Lasersintern“ bezeichnet [3D 05]. Von dieser Bezeichnung

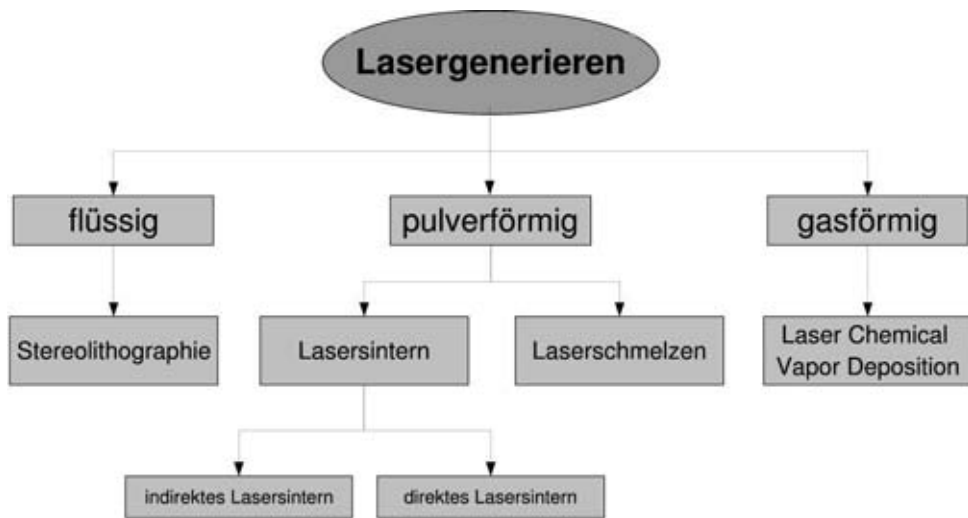


Abbildung 2.1: Begrifflichkeiten des Lasergenerierens

ausgehend sind auch die später entwickelten Verfahren häufig unter dem Begriff „Lasersintern“ zusammengefasst worden.

Das klassische Verständnis des Sinterns setzt eine Verbindung zweier benachbarter Teilchen bei hohen Temperaturen und eventuell auch hohem Druck voraus, wobei sich an der Kontaktstelle ein sog. Sinterhals ausbildet. Die Temperaturen liegen bei einkomponentigen Werkstoffen unter der Schmelztemperatur und bei mehrkomponentigen Werkstoffen im Bereich der Schmelztemperatur der niedrighschmelzenden Phase [Sch92]. Daher kann bei der Verarbeitung von Thermoplasten und Polymeren im Lasergenerierprozess in vielen Fällen von einem Sintervorgang gesprochen werden [Nel93], bei der Übertragung auf einkomponentige Metallpulver kann der Begriff Sintern irreführend sein. Aus diesem Grund wird der Begriff Sintern im Folgenden nur für die der Sintertheorie folgenden Beschreibungen verwendet und das übergeordnete Fertigungsverfahren als Lasergenerieren bezeichnet. Somit wird vermieden, eine Prozessbezeichnung mit einem werkstoffkundlichen Vorgang gleichzusetzen, der die tatsächlichen Vorgänge während des Prozesses nicht für jedes verwendete Material korrekt beschreibt. In den letzten Jahren sind Lasergenerieranlagen vorgestellt worden, die diese Problematik durch die Namensgebung „Selective Laser Melting“ (Fa. MCP HEK GmbH [MCP05]), „Laser Cusing“ (Fa. Concept Laser GmbH [Con05]) und „Laserformen“ (Fa. Trumpf GmbH [Tru05]) umgehen.

Seit der Vorstellung des ersten kommerziellen Lasergenerierprozesses von Kunststoffpulvern sind zahlreiche Anstrengungen unternommen worden, die verfügbare Materialpalette zu erweitern. Grundlegende Untersuchungen zum Lasergenerieren von Metallen, Keramiken und Verbundwerkstoffen sind in den neunziger Jahren veröffentlicht worden (u.a. [Gre96], [Cor98], [HRGK98], [Mei99], [Geb00]). Der Schwerpunkt der Entwicklungen lag und liegt auf der Untersuchung und Optimierung der Bauteilqualität

metallischer Werkstoffe. Im Bereich keramischer Werkstoffe sind von Wirtz und Krause detaillierte Untersuchungen veröffentlicht worden, die in weiteren Arbeiten fortgesetzt werden [Wir00] [Kra00]. Die meisten Untersuchungen haben zum Ziel, einen industriell umsetzbaren Prozess mit vorgegebenen Werkstoffen zu entwickeln. Dazu wird empirisch das Prozessfenster ermittelt und zum Teil theoretisch der Prozess und die wichtigsten Wirkmechanismen abgebildet. Die hier erzielten Ergebnisse lassen sich auf neue für den Lasergenerierprozess zu qualifizierende Werkstoffe nicht direkt übertragen.

Nur eine ganzheitliche wissenschaftliche Betrachtung des Systems Werkstoff, Anlagentechnik und Lasergenerierprozess ermöglicht die effiziente Entwicklung neuer Werkstoffsysteme für das Lasergenerierverfahren.

2.1.2 Funktionsprinzip und Anlagenkonzepte

Das Lasergenerieren ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem dreidimensionale Bauteile in einem rechnergesteuerten Prozess schichtweise aufgebaut werden. Voraussetzung für alle oben genannten Verfahren ist ein 3D-Modell des Zielbauteiles in einem Standard-Grafikformat. Für das Lasergenerieren hat sich als Eingangsdatenformat das STL (Standard Triangulation Language)-Datenformat durchgesetzt. Hierbei wird die Oberflächentopologie des 3D-Modells durch Dreiecke beschrieben und die Dreieckskoordinaten werden in einer einfachen Textdatei gespeichert (sowohl ASCII als auch binäre Daten sind möglich), womit eine einfache, softwareunabhängige Modellbeschreibung geschaffen worden ist. In einem anschließenden Verarbeitungsschritt werden die Daten in entsprechende Querschnitte (2D-Schichten) definierter Höhe zerlegt (Slicen) und ein anlagenspezifischer Datensatz erzeugt, der von der Anlagensteuerung weiterverarbeitet werden kann. Ausgehend von dieser Schichtgeometrie wird der Belichtungsvorgang durch den Laser gesteuert. Durch den schichtweisen Aufbau ist die Zugänglichkeit des Werkzeuges „Laserstrahl“ nicht behindert und komplexe Geometrien mit innenliegenden Kanälen, Hinterschneidungen oder Freiformflächen können aufgebaut werden. Abbildung 2.2 fasst diese Schritte zusammen. Der Aufbau des Bauteiles erfolgt auf einer Substratplatte in einem Zyklus aus Pulverauftrag und Laserbelichtung schichtweise bis zur Bauteilhöhe (vgl. Abbildung 2.3):

1. Pulverauftrag

Die Bauplattform wird um den Betrag der Schichthöhe abgesenkt und aus einem Pulvervorrat eine neue Pulverschicht aufgetragen.

2. Laserbelichtung

Die neue Pulverschicht wird entsprechend der aktuellen Schichtinformationen zeilenweise durch den Laserstrahl belichtet. Dieser Vorgang wird auch als Scannen bezeichnet. In diesem Prozessschritt erfolgt eine thermische Aktivierung der Pulverkörner, die sich mit den benachbarten Teilchen und der tieferliegenden Schicht

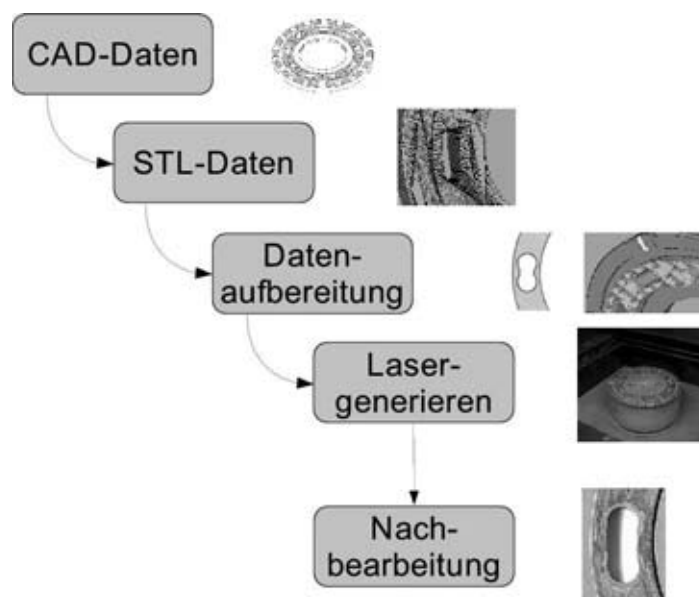


Abbildung 2.2: Prozessablauf

verbinden und beim Abkühlen verfestigen.

Die so erhaltenen Bauteile sind anwendungsfallsspezifisch nachzubearbeiten, da die Oberflächenrauheit von der Pulverkorngroße abhängig ist und die Detailgenauigkeit durch die Prozessführung beeinflusst wird (s. Kap. 4.3).

Zurzeit sind fünf Anlagentypen unterschiedlicher Hersteller auf dem Markt verfügbar, die nach dem gleichen Prinzip Bauteile fertigen, sich aber durch einige Anlagenspezifika voneinander unterscheiden. Von der Fa. 3D Systems wird eine SLS-Anlage angeboten, die die Verarbeitung sowohl von Polymeren als auch Metallpulvern mit Binderkomponenten in einem Anlagentyp erlaubt. Die Fa. EOS hingegen vertreibt drei Anlagentypen, die für die verwendeten Materialien spezifisch ausgestattet sind, so ist für die Sandverarbeitung ein großer Bauraum bei geringer Laserleistung vorgesehen, während die Metallmaschinen (M250^{Xtended} und M270) mit leistungstärkeren Lasern versehen sind [EOS05]. Concept Laser vertreibt ein modulares Anlagenkonzept, in das sowohl eine Lasersintereinheit als auch eine Laserabtrageeinheit integriert werden kann [Con05]. Unter dem Namen SLM bietet die Fa. MCP HEK eine Laserschmelzanlage an, die mit einem Faserlaser einkomponentige Metallpulver verarbeiten kann [MCP05]. Die Fa. Trumpf bietet seit 2003 mit der TrumaForm eine Lasergenerieranlage mit einem Scheibenlaser und zwei Prozesskammern an [Tru05]. Die Tabelle 2.1 stellt die wichtigsten Daten der kommerziell verfügbaren Anlagen zusammen. Neben den geometrischen Abmessungen und steuerungstechnischen Besonderheiten zeigen sich die Unterschiede der vorgestellten Anlagentechnik zum einen in der Art der verwendeten Laserquelle und damit der eingesetzten Laserwellenlänge und zum anderen in der Art des Pulverauf-

	EOSINT M 250 ^{Xtended}	EOSINT M 270	Laser Cusing M3 linear
Laser	CO ₂ -Laser 200 W	Faserlaser 200 W	Festkörperlaser 100 W
Wellenlänge	10.6 μm	1.08 μm	1.062 μm
Strahlqualität Beugungsmaßzahl M^2	≤ 1.2	≤ 1.1	≈ 7
Fokusbereich [mm]	0.4	0.1 – 0.5	0.2
Scangeschwindigkeit [max.]	3 m/s	3 m/s	3 m/s
Schichtdickenbereich	20 – 100 μm	20 – 100 μm	25 – 100 μm
Bauraum [mm × mm × mm]	250 × 250 × 185	250 × 250 × 215	250 × 250 × 250 oder 350 × 300 × 250
Pulverauftrag	starre Klinge		zwei starre Klingen
Pulvervorrat	parallel		parallel
Quelle	[EOS05]		[Con05]

	MCP Realizer II SLM	TrumaForm LF260	VANGUARD
Laser	Faserlaser 100 W	Scheibenlaser 250 bzw. 500 W	CO ₂ -Laser 25 bzw. 100 W
Wellenlänge	1.085 μm	1.03 μm	10.6 μm
Strahlqualität Beugungsmaßzahl M^2	≤ 1.05	SPP: 4 mm · mrad	≈ 1
Fokusbereich [mm]	0.1	0.2 – 0.4	0.45
Scangeschwindigkeit [max.]	4 m/s	2 m/s	7.5 und 10 m/s
Schichtdickenbereich	> 20 μm	20 – 100 μm	> 50 μm
Bauraum [mm × mm × mm]	250 × 250 × 250	Ø260 × 160	381 × 330 × 457
Pulverauftrag	flexibler Wischer	Carbon Brush	Rolle
Pulvervorrat	oben	oben	parallel
Quelle	[MCP05]	[Tru05]	[3D 05]

Tabelle 2.1: Ausgewählte Daten marktverfügbarer Lasergenerieranlagen für metallische Pulverwerkstoffe

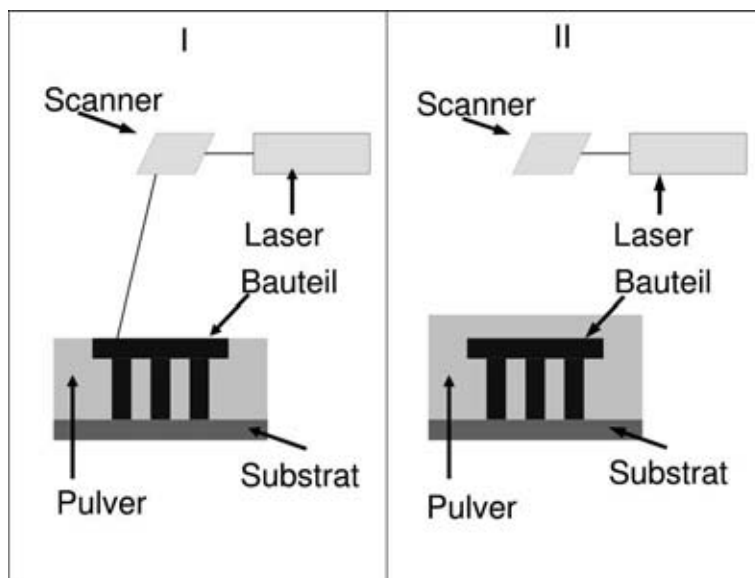


Abbildung 2.3: Prinzip des Lasergenerierens [PE05]

trags. Von 3D Systems wird eine Rolle verwendet, die das neue Pulver vor sich her treibt, im Gegensatz hierzu setzen die anderen Anbieter Klingen oder Wischer ein, die starr oder flexibel gestaltet werden. Trumpf verwendet eine Kohlefaserbürste, die einen gleichmäßigen Pulverauftrag ohne Krafteinwirkung auf das Pulverbett umsetzt. Zusätzlich kann der Pulvervorrat in einem zweiten, neben der Bauplattform angeordneten Behälter vorgelegt oder aber durch einen über der Bauplattform angeordneten Behälter zugeführt werden, Abbildung 2.4 verdeutlicht diese Unterschiede. Durch die Art der Pulverzuführung wird die Pulververdichtung beim Pulverauftrag und damit die erzielbare Schüttdichte beeinflusst. Für die hier durchgeführten Untersuchungen kommt eine EOSINT M 250 zum Einsatz, deren Spezifikationen im Rahmen der Prozessanalyse näher erläutert werden.

Für das Lasergenerieren können alle pulverförmigen Werkstoffe eingesetzt werden, die sich aufschmelzen lassen und bei einer Abkühlung möglichst verzugsfrei und volumenkonstant verfestigen [Geb00]. Abbildung 2.5 fasst die zurzeit verfügbaren Werkstoffe zusammen. Neben den Kunststoffpulvern sind auch Sandwerkstoffe für die Gussformenherstellung kommerziell verfügbar. Der Fokus jüngster Untersuchungen liegt auf der Untersuchung von metallischen Systemen zur Herstellung von Funktionsprototypen oder auch Kleinserien. Weiterhin werden spezielle technische Keramiken im Lasergenerierprozess verarbeitet. Eine Besonderheit zeichnet den Lasergenerierprozess von metallischen Pulvern im Vergleich zu Thermoplasten aus: da das Metallpulver eine geringere Stützwirkung hat, ist es notwendig, Überhänge und Schrägen durch sogenannte Supportstrukturen abzustützen. Dabei wird zwischen externen und internen Supports unterschieden. Externe Supports verbinden das Bauteil fest mit der Substratplatte

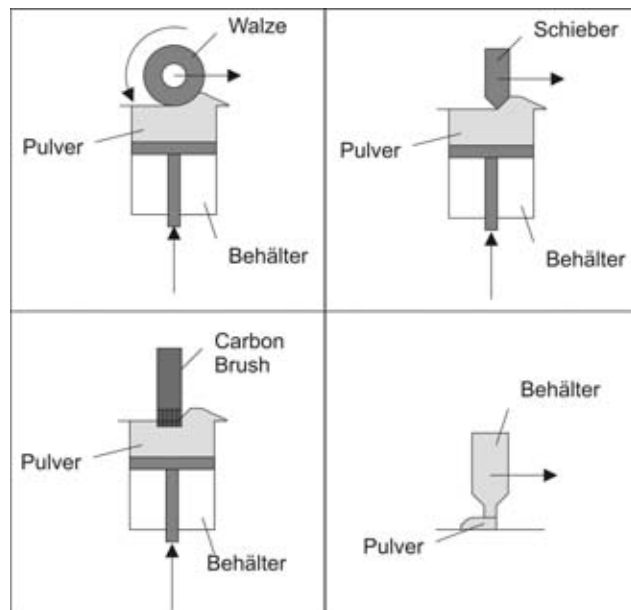


Abbildung 2.4: Möglichkeiten des Pulverauftrages nach [Mei99]



Abbildung 2.5: Werkstoffsysteme für das Lasergenerieren aus pulverförmigen Ausgangsmaterialien