

Laser Metal Deposition

Als Experte für Löten, Wärmebehandlung und Elektronenstrahlschweißen beschloss die Listemann Technology AG, ihr Portfolio zu erweitern und erwarb 2021 eine Pulver-LMD-Maschine von der Firma BeAM.

Aber was genau ist die LMD-Technologie?

LMD steht für „Laser Metal Deposition“. Es handelt sich dabei um ein Schweiß- und additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Laser als Wärmequelle eingesetzt wird, der auf ein Substrat gerichtet ist, ein Schmelzbad bildet und gleichzeitig das in Form von Pulver oder Draht in das Schmelzbad eingebrachte Ausgangsmaterial schmilzt (Abb. 1). Das mehrschichtige Bewegungssystem legt das aufgeschmolzene Metall Schicht für Schicht ab, um ein Teil aufzubauen oder einem bestehenden Teil Materialschichten hinzuzufügen. Die Liste der Legierungen, die mit dieser Technologie kompatibel sind, ist äußerst vielseitig und umfasst, ohne darauf beschränkt zu sein, viele schweißbare Legierungen. Am häufigsten sind darunter Metalle auf Nickel-, Titan-, Kobalt-, Eisen- und Kupferbasis sowie Hartmetall zu finden.

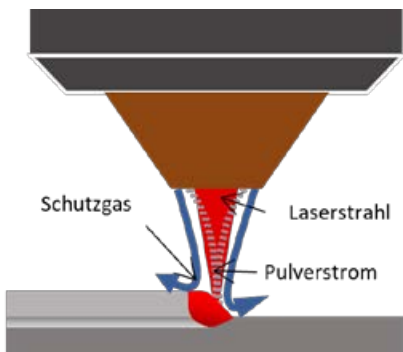


Abb. 1: Prozess-Prinzip

Die Anwendungen

Die am weitesten verbreitete AM-Technologie auf dem Markt ist das Laser-Pulverbett-Schmelzverfahren (L-PBF), auf das mehr als die Hälfte des weltweiten AM-Umsatzes entfällt [1]. Die LMD-Technologie stößt jedoch aufgrund ihrer einzigartigen Fähigkeiten auf wachsendes Interesse in der Branche. Der Hauptgrund, der LMD zu einer bevorzugten Technologie macht, ist die Anwendungsvielfalt. Mit einer einzigen Maschine können Near-Net-Shape Teile (Abb. 2a) hergestellt werden, größer und schneller als mit anderen AM-Verfahren, und herkömmliche Bearbeitungs- oder Beschichtungsmethoden können

Abb. 3. Ishikawa-Diagramm

durch Laserauftragsschweißen ersetzt oder ergänzt werden z.B. zur Reparatur, Funktionserweiterung oder zur Nutzung von Mehrstoffsystemen (Abb. 2b-2e).

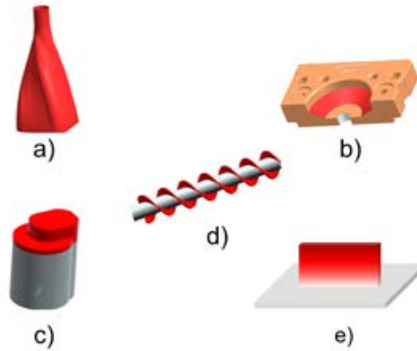


Abb. 2. LMD-Anwendungen (a) Near-Net-Shape, (b) Beschichtung, (c) Reparatur, (d) Hinzufügen von Funktion, (e) Mehrstoffsystem

Qualität und Metallurgie

Viele der in Abbildung 3 aufgeführten Parameter beeinflussen die endgültige Qualität und die mechanischen Eigenschaften von LMD-Schichten. Um den richtigen Parametersatz für eine bestimmte Kombination von Rohmaterial und Substrat zu finden, werden in einem ersten Schritt einzelne Schweißnähte auf einem Substrat hergestellt und die Laserleistung, die Beschichtungsgeschwindigkeit und die Pulverzufuhr auf einem Substrat variiert, wie in Abb. 4 (a) dargestellt. Geometrische Merkmale wie die Breite und Höhe der Schweißnaht, der Kontaktwinkel und die Auflockerung in den Substraten werden analysiert (Abb. 4 (d)), um die primären Beschichtungsparameter zu bestimmen.

Dann werden neue Schichten aufgebaut, wobei der so genannte Schraffurabstand ΔXY (Abb. 4 (b)) und die Höhenzunahme ΔZ (Abb. 4 (c)) variiert werden, die jeweils als der Versatz zwischen zwei benachbar-

ten Schweißbahnen und die Höhe, in der die Düse zwischen den einzelnen Schichten ansteigt, definiert sind. Diese Parameter müssen so gewählt werden, dass der Abstand zwischen Teil und Düse konstant bleibt und gleichzeitig die höchste Effizienz und Dichte der Pulveraufnahme gewährleistet ist.

Da es sich bei LMD um ein schichtweises Herstellungsverfahren handelt, sind die Teile wiederholten Aufheiz- und Abkühlzyklen mit schnellen Abkühlraten (bis zu 10^5 K/s [2]) ausgesetzt. Folglich weisen sie oft heterogene Mikrostrukturen und anisotrope mechanische Eigenschaften auf.

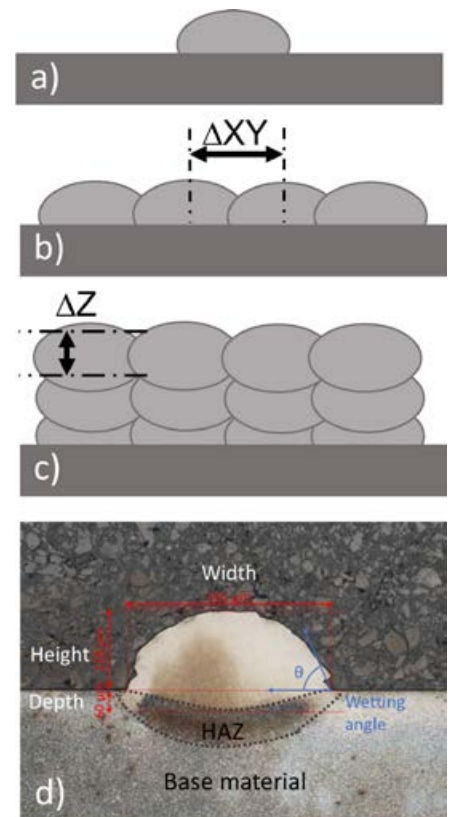
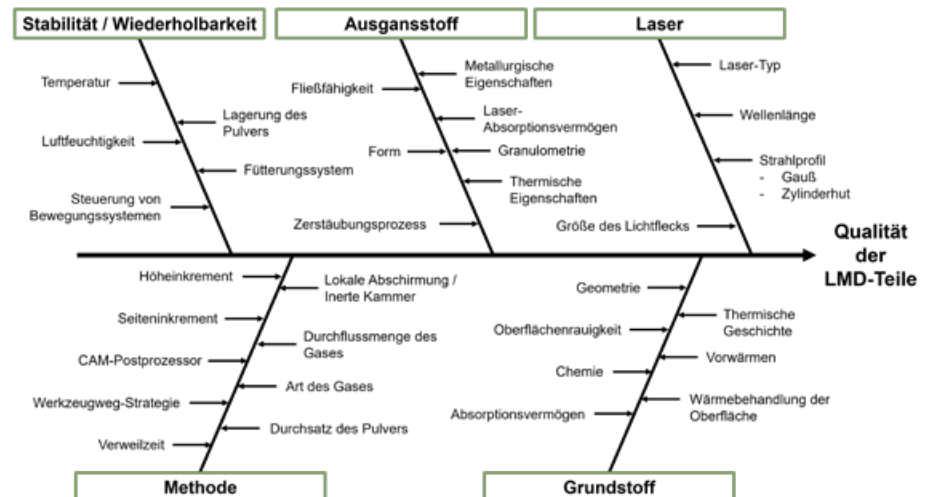


Abb. 4. Schritte einer parametrischen Forschung



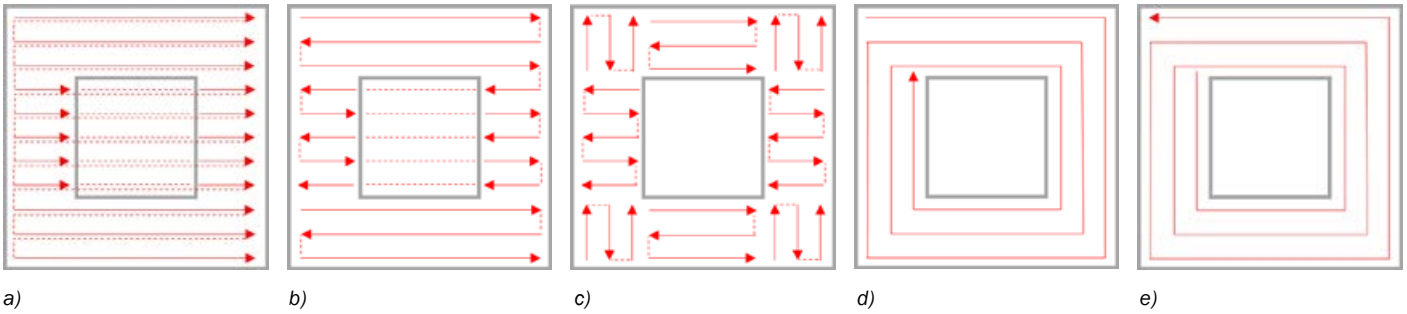


Abb. 5. Hauptabtastmuster (a) Zig (b) Zickzack (c) Schachbrett (d) Spirale innen (e) Spirale außen

Insgesamt führen ungeeignete Parameter entweder zu Programmabbrüchen aufgrund von Instabilitäten oder zu Nichtkonformitäten wie:

- Verschlechterte mechanische Eigenschaften
- Unerwünschte Phasenumwandlungen
- Verformungen
- Schlechte Oberflächengüte
- Porosität

Bei einigen Geometrien reicht die Optimierung der Parameter nicht aus, um ein fehlerfreies Werkstück zu erhalten. Der Wärmestau im Inneren des Teils kann zum Teil durch eine geeignete Werkzeugbahn, deren verschiedene Abtaststrategien in Abb. 5 dargestellt sind, und durch geschickt gewählte Pausenzeiten gesteuert werden. Einige CFD-Programme können helfen, die Entwicklungszeit zu verkürzen, indem sie die verschiedenen Laser/Pulver/Gas-Wechselwirkungen simulieren, die am LMD-Prozess beteiligt sind.

Laserstrahl-Auftragsschweißen / Beschichtung

Laserstrahl-Auftragsschweißen (LA) kann in einigen Fällen als Alternative zum thermischen Spritzen oder zur Galvanisierung verwendet werden. Die Hauptvorteile bestehen darin, dass LA im Gegensatz zu den beiden letztgenannten Verfahren eine vollständig dichte metallurgische Verbindung erzeugt (Abb. 6). Dies trägt zu einer höheren Kerbschlagzähigkeit bei. LA bietet eine größere Flexibilität für die Herstellung dicker Schichten, während die Schichtdicke beim thermischen Spritzen begrenzt ist, um das Auftreten von Problemen wie Abplatzungen zu vermeiden.

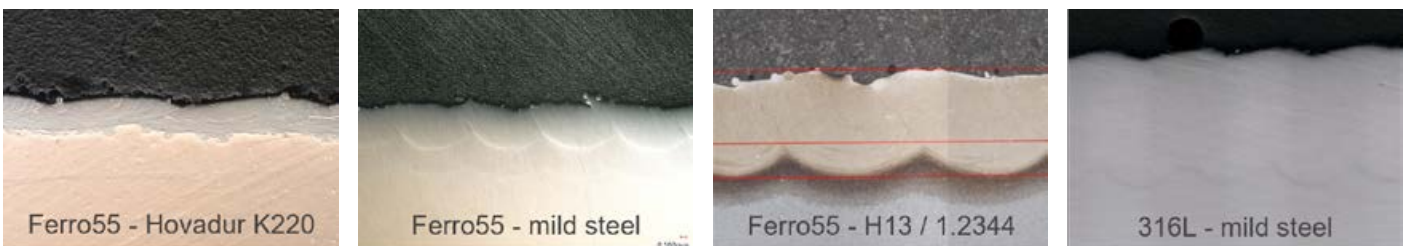


Abb. 6. Verschiedene Kombinationen von Werkstoffen für Oxidations- oder Verschleißfestigkeit

hindern. Außerdem führt die geringe Wärmeeinbringung bei diesem Verfahren im Vergleich zu herkömmlichen Schweißverfahren zu einer geringeren Aufmischung mit dem Substrat, was zu einer geringeren Verformung des Teils und einer kleineren Wärmeeinflusszone führt. Die kleinere Mischzone zwischen Bauteil und Substrat ermöglicht mehr Werkstoffkombinationen, einschließlich des Schweißens von traditionell "nicht schweißbaren" Legierungen. Letztendlich führt der Einsatz von LMD zu neuen Werkstoffauswahlmöglichkeiten, wobei z.B. in den anwendungsbasierten kritischen Bereichen eines Bauteils eine Schicht aus einem Hochleistungswerkstoff auf ein kostengünstiges Substrat aufgetragen wird, wodurch sich die Gesamtkosten des Bauteils drastisch verringern.

Reparatur

Das weltweite Interesse an nachhaltigeren und kosteneffizienteren Fertigungsverfahren wächst, und LMD gewinnt als Möglichkeit zur Verlängerung der Lebensdauer beschädigter Teile an Interesse. Bis vor kurzem konnten unvorhergesehene verschlissene oder gebrochene Teile nicht repariert werden, was oft zu teuren Ausfallzeiten führte, während man auf den richtigen Ersatz wartete. Die jüngsten Verbesserungen in der LMD-Technologie und -Produktion ermöglichen schnellere und kostengünstigere Reparaturen. Dies ist eine besonders wettbewerbsfähige Option für große oder komplexe Hochleistungsteile mit langen Produktionszeiten. Durch die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Teils anstelle des Austauschs werden auch der Materialeinsatz, der Energieverbrauch, die Vorlaufzeit für das Bauteil und die Kosten für die

Ersatzteillagerung reduziert. Die aktuellen Überlegungen zu den Umweltauswirkungen der Fertigung sind ein wichtiger Grund für die zunehmende Verbreitung von LMD. Die Prozessschritte sind in Abb.7 dargestellt.

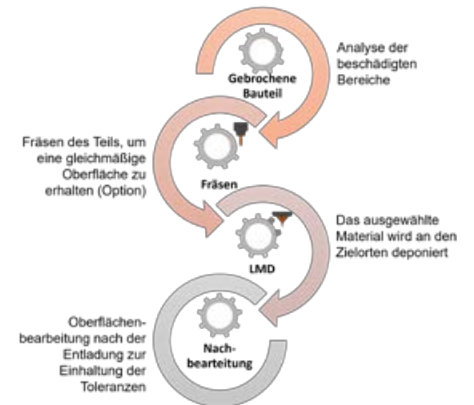


Abb. 7. Schritte zur Reparatur eines verschlissenen Teils

Mehrstoffsysteme

Darüber hinaus bietet Pulver-LMD eine große Freiheit im Bereich der Materialien. Durch die Verwendung von Mehrfachtrichtern in Kombination mit einem programmierten Pulverzufuhrsystem können Mehrstoffstrukturen und Legierungsdesigns hergestellt werden (siehe Abb. 8). Die Menge, das Volumen, die Form und die Lage der einzelnen Materialien können präzise gesteuert werden, um die gewünschten Eigenschaften für eine bestimmte Anwendung zu erzielen.

(a) Unabhängige Verwendung verschiedener Legierungen (jeder Pulverbehälter enthält eine bestimmte Legierung) in einem einzigen Produktionsschritt, wo-

bei das richtige Material an der richtigen Stelle aufgebracht wird.

- (b) Gleichzeitige Verwendung mehrerer Werkstoffe, wobei die Legierungszusammensetzung von unten nach oben gleichmäßig variiert. Solche funktional abgestuften Werkstoffe (FGM) haben den Vorteil, dass scharfe Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Werkstoffen vermieden werden. Dadurch wird das Risiko von Frühausfällen aufgrund von Eigenspannungen verringert und die mechanische Integrität der Verbindung verbessert.
- (c) Durch Verwendung eines vorgemischten Pulvers oder durch Mischen eines Metallpulvers, das die Rolle der Metallmatrix übernimmt, mit harten Partikeln ist es möglich, einen Metallmatrix-Verbundwerkstoff (MMC) abzuscheiden. Extrem verschleißfeste und schlagzähe Beschichtungen, wie vorlegierte Cermets wie WC-Co [3], wurden bereits mit LMD aufgebracht. Sie weisen eine gute Kombination aus Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, Härte und Zähigkeit auf und bieten vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten im Werkzeug- und Bergbausektor.
- (d) Die Verwendung von mehr als zwei Trichtern ermöglicht die Herstellung von maßgeschneiderten Legierungen. Die Forscher sind sehr an der Einführung von High Entropy Alloy (HEA) interessiert, definiert als Legierungen mit gleichen oder nahezu gleichen Mengen von fünf oder mehr Komponenten [4]. Eine der Erwartungen ist die Schaffung neuer Werkstoffe mit hoher Festigkeit und hoher Duktilität bei hohen Temperaturen für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt.

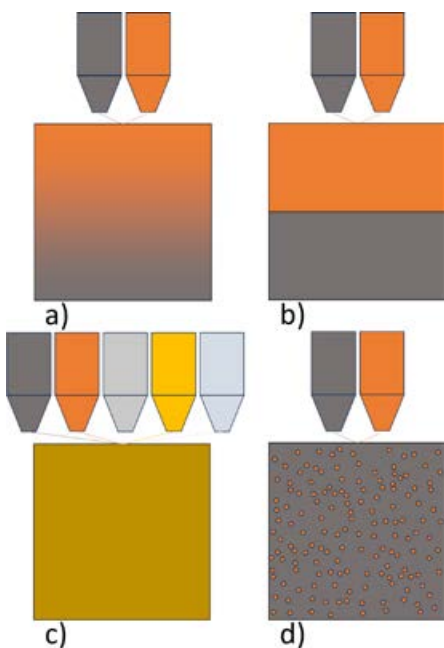


Abb. 8. Werkstoffkombinationen mit Pulver-LMD

Near-Net-Shape

Dank der 5 oder mehr-Achsen-Baukammer kann LMD ein hohes Maß an Designkomplexität bewältigen. Das französische Institut IRT Saint-Exupéry, hat im Rahmen des „DePÔz“-Projekts einen fortschrittlichen LMD-Demonstrator hergestellt (Abb. 9), der komplexe Merkmale mit hoher geometrischer Genauigkeit aufweist, z.B. Wabenstrukturen, dünne und dicke Wände und viele Überschneidungen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Fertigungsprozesskette zu vereinfachen, indem die Anzahl der Schritte zur Herstellung eines Bauteils reduziert wird. Es eignet sich auch für schwer zu bearbeitende oder teure Ausgangsmaterialien wie Titanlegierungen und Superlegierungen auf Nickelbasis. Die Herstellung von endkonturnahen Teilen trägt dazu bei, den Materialverbrauch und die Nachbearbeitungskosten zu reduzieren. Für Industriezweige, die mit Kleinserien arbeiten und teure Formen und Werkzeuge benötigen, kann LMD eine nachhaltige Alternative darstellen und den Grad der Anpassbarkeit durch Fertigung auf Abruf erhöhen.



Abb. 9. IRT-Demonstrator

Material-Aufbaufunktion

Near-Net-Shape-Teile haben sich als wirtschaftlich tragfähig erwiesen, sind aber nicht immer die kostengünstigste Lösung. Dank der Vielseitigkeit des LMD-Verfahrens sind viele Konstruktionsstrategien denkbar. Das richtige Material kann an der richtigen Stelle hinzugefügt werden, wodurch der Mehrwert des Produkts maximiert wird. Ein Beispiel dafür ist die Förderschnecke (Abb. 10), für die wir ein kostengünstiges, handelsübliches Stahlrohr verwenden und nur die erforderliche Geometrie aufarbeiten. Diese Fertigungsmethode eignet sich besonders für Teile, die aus einem Rohling gefräst werden und einen hohen Verschnitt aufweisen. Bei Turbinenschaufeln, die mit konventionellen Fertigungsverfahren hergestellt werden, beträgt das Verhältnis von eingekauftem Material zum Gewicht des fertigen Teils etwa 20:1 [5]. Angesichts der hohen Preise und der schlechten Bearbeitbarkeit von Werkstoffen wie Inconel oder Titanlegierungen lassen sich durch das Zufügen von spe-

zifischen Funktionsmerkmale die Herstellungs- und Rohstoffkosten minimieren.



Abb. 10. Förderschnecke

Fazit und Ausblick

LMD ist nicht nur ein additives Fertigungsverfahren, sondern hat sich als vorteilhafte und anpassungsfähige Technologie zur Steigerung von Produktivität und Innovation erwiesen. Aufgrund ihrer besonderen Fähigkeiten wird die LMD-Technologie zunehmend eingesetzt. Zu den Vorteilen der LMD-Technologie gehören kürzere Vorlaufzeiten, die Aufarbeitung von Ausschussteilen, ein geringerer Kohlenstoff-Fußabdruck, eine längere Lebensdauer der Bauteile und die Verwendung innovativer Materialkombinationen. Dank der Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten bietet das LMD-Verfahren enorme Potentiale für die Herausforderungen der Zukunft, sei es im Bereich des schonenden Umgangs mit der Energie, der Reduzierung des Abfalls oder der optimierten Verwertung von Ressourcen und wird somit zu einem praktischen Ansatz für eine nachhaltige Fertigungsindustrie.

Referenzen

- [1] Overall Additive Manufacturing market valued at EUR 7.18 billion in 2020 (additive-manufacturing-report.com)
- [2] David Svetlizky. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. 2021
- [3] Yuhong Xiong. Fabrication of WC-Co cermets by laser engineered net shaping. 2008
- [4] Shuo Xiang. Microstructures and mechanical properties of CrMnFeCoNi high entropy alloys fabricated using laser metal deposition technique. 2019
- [5] Ayush Sinha. A Review on the Processing of Aero-Turbine Blade Using 3D Print Techniques. 2022

Kontakt
 Listemann Technology AG
 Astrid Lecouturier, a.lecouturier@listemann.com
 Bernard Kuntzmann, b.kuntzmann@listemann.com
 Ober Au 38, 9487 Bendern, Liechtenstein