

Un concetto di assicurazione qualità per la manifattura additiva

consente la produzione in serie con una qualità definita

(Articolo tecnico del 2019, autori: A. Dsuban, J. Lohn)



Sintesi

L'impiego dei processi di manifattura additiva, da soli o in combinazione con i processi di produzione tradizionali, offre molte nuove potenzialità. Grazie alla costruzione diretta strato per strato dei componenti a partire da dati 3D CAD, i processi additivi possono realizzare praticamente qualsiasi struttura, consentendo spesso di risparmiare materiale e costi rispetto alla produzione convenzionale.

Per garantire la qualità dei componenti vengono prese in considerazione le norme di gestione della qualità basate sulla DIN EN ISO 9001:2015, di particolare rilevanza per le aziende manifatturiere. Oltre alle norme di gestione della qualità esaminate, un aspetto importante trattato in questo articolo è la riproducibilità, insieme alla dimostrabilità di un elevato livello di sicurezza del prodotto. A tale scopo viene sviluppato, con l'ausilio di diversi documenti normativi, un concetto di assicurazione qualità che trova applicazione in particolare nei processi di produzione a letto di polvere.

Introduzione

Rispetto ai processi di produzione convenzionali di tipo sottrattivo (tornitura, foratura, fresatura) e formativo (forgiatura, fusione, piegatura), i processi di manifattura additiva presentano numerosi vantaggi. Ad esempio, grazie alla costruzione diretta dei componenti a partire dai dati 3D CAD, il time-to-market può essere ridotto in misura significativa. Inoltre, la costruzione diretta dai dati di progettazione offre la possibilità di realizzare rapidamente i prototipi.

La produzione dei prodotti sviluppati è soggetta a poche restrizioni, per cui è possibile fabbricare componenti personalizzati e complessi senza costi aggiuntivi. Inoltre, il riciclo degli scarti di processo determina l'elevata economicità che caratterizza la manifattura additiva.

Nella fusione laser selettiva, ad esempio, gli scarti di processo si riducono del 90%, poiché la polvere non fusa presente negli spazi tra i componenti può essere riutilizzata per la produzione dopo un processo di setacciatura [1, 2].

Alla luce di queste peculiarità, alla manifattura additiva viene attribuito un potenziale dirompente: per via del

suo particolare processo produttivo non si ricollega ai processi di produzione convenzionali esistenti, ma occupa un campo completamente nuovo della produzione di beni [1].

Per poter sfruttare al meglio il potenziale di questa tecnologia in futuro, occorre approfondire ancora molti aspetti. Oltre al continuo ampliamento della gamma di materiali, ne fa parte anche un concetto standardizzato di assicurazione qualità che consenta una qualità riproducibile dei componenti prodotti, ampliando così il campo d'impiego dei prodotti stampati in 3D.

Sviluppo di un concetto di assicurazione qualità per la manifattura additiva

La creazione e il mantenimento di prodotti e servizi conformi a una qualità definita sono soggetti a diversi concetti di assicurazione qualità. Il campo di applicazione finale dei beni prodotti è un fattore determinante per l'estensione della gestione della qualità da applicare.

Dato l'elevato potenziale dei processi di manifattura additiva per numerosi settori industriali, tra cui l'industria aerospaziale, si ricercano concetti di assicurazione qualità adeguati ai rispettivi campi di applicazione. In questo contesto, di seguito viene presentata una serie di concetti di assicurazione qualità finalizzati al rispetto degli standard qualitativi richiesti.

La norma fondamentale per la gestione della qualità DIN EN ISO 9001:2015 [4] (ISO 9001) ha lo scopo di garantire che le aziende dispongano di un sistema di gestione funzionante e facciano tutto il possibile per offrire prodotti e servizi di alta qualità. Una verifica da parte di auditor qualificati viene svolta ogni anno e confermata all'azienda con il rilascio di un certificato.

Il certificato ISO 9001 aiuta i clienti a individuare le aziende che si sono impegnate a rispettare gli standard richiesti e che li applicano.

Gli standard richiesti si basano sui "sette principi di gestione per la qualità": focalizzazione sul cliente, leadership, partecipazione attiva delle persone, approccio per processi, miglioramento, processo decisionale basato sulle evidenze e gestione delle relazioni [3].

La ISO 9001 richiede all'azienda sottoposta a verifica il rispetto e la dimostrazione dei punti indicati nel modello di processo (figura 1).

La dimostrazione dei singoli punti può avvenire per mezzo di un manuale. Questo cosiddetto "manuale della

qualità" può essere strutturato in modo individuale oppure secondo i capitoli della norma. In base alla suddivisione della norma, nel capitolo 4.1 occorre descrivere la comprensione dell'organizzazione e del suo contesto.

Nel successivo sottocapitolo 4.2 occorre identificare le parti interessate dell'azienda e indicarne le esigenze e le aspettative.

Nei capitoli 4.3 e 4.4 vanno considerati il campo di applicazione del sistema di gestione per la qualità e i relativi processi.

Nel capitolo 5 occorre definire e caratterizzare il livello direttivo e i suoi compiti nell'ambito della gestione della qualità.

Il capitolo 6 deve fornire una panoramica della pianificazione in azienda.

Nella pianificazione occorre fare in modo che siano definite azioni per affrontare rischi e opportunità. Occorre inoltre stabilire gli obiettivi per la qualità e ricavarne misure adeguate per la loro attuazione.

Nel successivo capitolo 7 vanno individuate e descritte le risorse che servono a supporto dell'azienda.

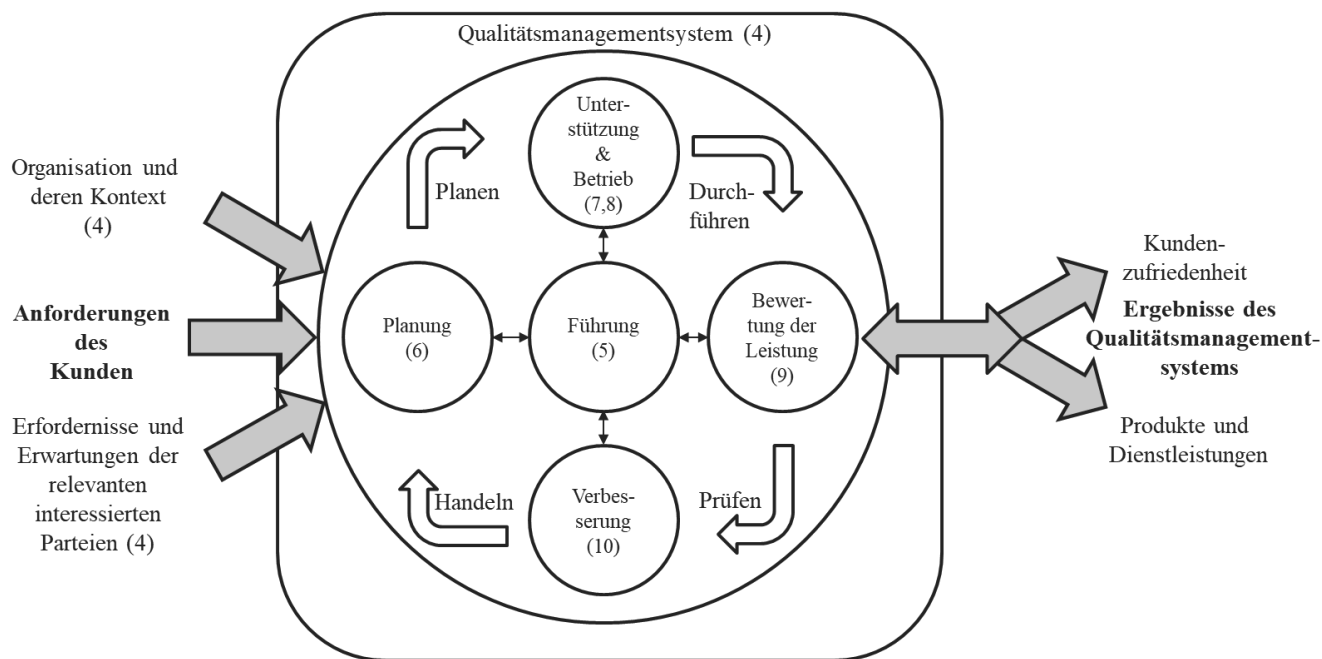
Nel capitolo 8 occorre illustrare l'attività operativa vera e propria dell'azienda. A tale scopo si possono trattare i processi aziendali e definirne più precisamente il ruolo nel processo di creazione del valore.

Nel successivo capitolo 9, tenendo conto del miglioramento continuo, occorre svolgere un'analisi approfondita della qualità in azienda. In questo contesto vanno, tra l'altro, valutati i prodotti e i servizi, considerata la soddisfazione del cliente ed effettuato un riesame del sistema di gestione per la qualità (SGQ).

Infine, nel capitolo 10 vanno esposte le possibilità che contribuiscono al miglioramento dell'azienda [3, 4, 5].

La IATF 16949 comprende lo standard di gestione della qualità dell'industria automobilistica e si basa su [4]. Se un'azienda è già certificata ISO 9001, il passaggio alla IATF 16949 può ridurre la durata dell'audit fino al 50%.

È stata pubblicata nel 2016 e da allora sostituisce la ISO/TS 16949:2009, valida fino al 14 settembre 2018 [6]. Il nuovo standard di gestione della qualità dell'industria automobilistica punta a un processo di miglioramento continuo particolarmente marcato, che deve aiutare a



▼ Figura 1: Modello di processo con i singoli capitoli della norma [4]

individuare ed evitare le fonti di errore e a ridurre al minimo la variabilità e gli sprechi lungo le catene di fornitura. Nell'ambito della IATF 16949 il cliente è posto ancora più al centro rispetto alla ISO 9001. Di conseguenza, i requisiti specifici del cliente devono essere valutati e presi in considerazione nel sistema di gestione per la qualità.

Inoltre, al cliente deve essere garantita una maggiore rintracciabilità dei prodotti durante il processo di produzione e dopo la consegna, per un periodo di tempo definito. Ai fini della sicurezza del prodotto, i collaboratori coinvolti nella produzione e nel collaudo di prodotti rilevanti per la sicurezza devono soddisfare i relativi fabbisogni formativi [7].

La DIN EN 9100:2016 (EN 9100) è una norma di gestione della qualità che riguarda i requisiti per le organizzazioni dell'aviazione, dello spazio e della difesa. La EN 9100 comprende l'intero contenuto della ISO 9001 e la integra con una serie di requisiti aggiuntivi.

Nel testo della norma questi requisiti sono riportati in corsivo, per poterli distinguere meglio dagli elementi classici della ISO 9001. Le differenze sostanziali derivano, tra l'altro, dall'introduzione della gestione della configurazione e dall'innalzamento dei requisiti relativi alla sicurezza del prodotto e alla gestione delle parti contraffatte.

Lo standard di gestione della qualità presuppone inoltre una documentazione e una valutazione più approfondite dei processi che si svolgono in azienda.

In questo contesto la gestione del rischio prevista dalla ISO 9001 viene estesa e si pratica un modo di pensare e di agire proattivo e basato sul rischio in tutte le attività dell'azienda (anche a livello strategico e operativo).

Un ulteriore aspetto da considerare con maggiore attenzione è il monitoraggio dei fornitori. A questo proposito si richiede almeno la misurazione della conformità dei prodotti o dei servizi e della puntualità delle consegne. A differenza della ISO 9001, la EN 9100 continua a prevedere un responsabile QM che garantisca operativamente il rispetto dei requisiti della norma [8, 9].

Considerata la sicurezza del prodotto spesso richiesta, si fa riferimento alla DIN 65124:2018-10. Questa norma è stata concepita specificamente per l'industria aerospaziale e stabilisce requisiti elevati per la produzione di componenti metallici mediante il processo di fusione laser selettiva.

I requisiti indicati di seguito servono a integrare uno standard QM e ad attuarlo meglio.

Per offrire componenti prodotti in modo additivo come fornitore in ambito industriale, un'azienda deve soddisfare numerosi fattori.

Come base occorre innanzitutto predisporre un sito produttivo idoneo, con condizioni ambientali costanti e attrezzature operative ammesse. Ciò presuppone, tra l'altro, l'impiego di macchine installate secondo le condizioni di installazione del costruttore e controllate a intervalli di manutenzione regolari da personale qualificato.

Le risorse necessarie per la produzione di componenti mediante fusione laser, come ad esempio la polvere metallica impiegata, devono essere qualificate dal produttore del materiale per il processo di manifattura additiva e soddisfare i requisiti specifici del processo. Fattori d'influenza importanti da verificare sono, ad esempio, la distribuzione granulometrica e la composizione chimica della polvere.

I parametri specifici del lotto di polvere fornito devono essere documentati in un certificato di ispezione 3.1 e messi a disposizione del cliente al momento della consegna. Successivamente il cliente è tenuto a provvedere a una gestione responsabile della polvere.

Una gestione della polvere conforme alla DIN 65124 presuppone una manipolazione che impedisca la contaminazione della polvere da parte di corpi estranei (polvere ambientale, essiccanti, polveri estranee). Occorre inoltre rispettare le misure preventive contro l'ossidazione e l'assorbimento di umidità della polvere metallica. Per rendere la gestione della polvere il più trasparente possibile, deve essere effettuata una documentazione dei lotti, grazie alla quale la polvere può essere identificata e rintracciata in qualsiasi momento. Questo obbligo di documentazione vale anche per le miscele di polveri. La polvere metallica può essere utilizzata più volte per la costruzione di componenti mediante fusione laser, purché vengano rispettate le prescrizioni dell'ente responsabile dello sviluppo [10].

Affinché possa avvenire una qualifica di processo lungo l'intero processo produttivo, si presuppone che i metodi applicati nella catena di produzione soddisfino i requisiti di qualifica necessari.

In questo contesto occorre definire preventivamente con il committente quale funzione e quali requisiti abbia il suo componente. Di conseguenza, secondo la DIN 65124 i componenti realizzati mediante fusione laser devono essere classificati in tre classi di sicurezza [10]:

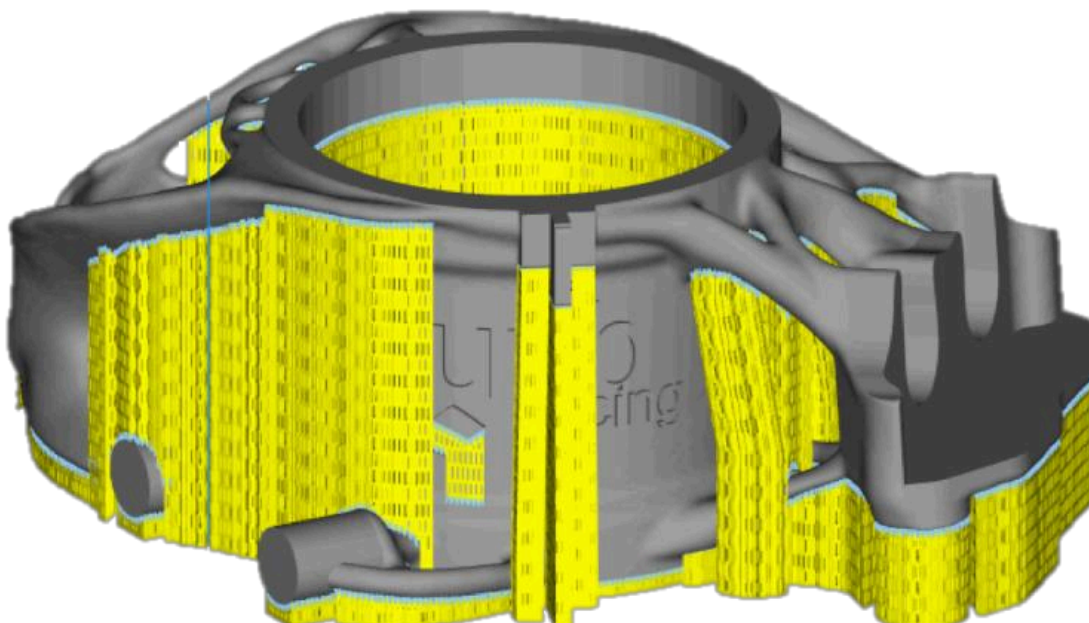
- Classe di sicurezza I: un guasto in condizioni di esercizio comporta la perdita del veicolo aerospaziale o dei

suoi componenti principali, mettendo direttamente in pericolo le persone.

- Classe di sicurezza II: un guasto in condizioni di esercizio provoca malfunzionamenti. La missione di trasporto, tuttavia, non è compromessa fino al suo completamento.
- Classe di sicurezza III: la sicurezza e la funzione di trasporto non dipendono da questo componente.

Oltre alla classificazione di sicurezza, occorre registrare i parametri di impostazione lungo il processo di creazione del valore. La documentazione serve a migliorare il monitoraggio del processo di costruzione e, oltre ai parametri di esposizione, deve comprendere il tipo di macchina, inclusi la versione hardware/software e il numero di serie, il luogo di installazione, il lotto di polvere, il tipo di racla, la specifica del gas (tipo), le impostazioni del gas e l'influenza di tutti i fattori citati sul componente. Vanno inoltre registrate le indicazioni relative al processo di produzione applicato, alla specifica della polvere, alla specifica del materiale del componente realizzato e al tipo di post-trattamento scelto. Occorre inoltre formulare valutazioni sulle caratteristiche ammesse e non ammesse del componente e sul collaudo del componente. Per ottenere risultati di costruzione il più possibile riproducibili, occorre stabilire e documentare i dati specifici dell'impianto. Questi forniscono informazioni sull'orientamento del componente nella camera di costruzione, sul tipo e sulla disposizione delle strutture di supporto scelte, nonché sul numero e sul posizionamento dei componenti. Per il distacco dei componenti dalla piastra di costruzione e la rimozione delle strutture di supporto, la DIN 65124 prevede procedimenti che non influiscano negativamente sulla qualità del componente. Si possono quindi utilizzare procedimenti come l'elettroerosione a filo e la segatura.

Per il trattamento superficiale finale e per ottenere la rugosità superficiale richiesta dei componenti si possono applicare, tra l'altro, processi di sabbiatura (corindone, microsfere di vetro) e di rettifica. Una successiva riparazione dei componenti o il ripristino di difetti è ammesso solo nel rispetto di un apposito programma di qualifica. Tale programma di qualifica stabilisce che le riparazioni possono essere eseguite solo con il consenso scritto del cliente, devono essere effettuate da personale specializzato e devono essere documentate in un verbale dettagliato, univocamente associabile al componente. Infine vanno eseguiti i metodi di prova stabiliti nella documentazione di costruzione. A questo punto il



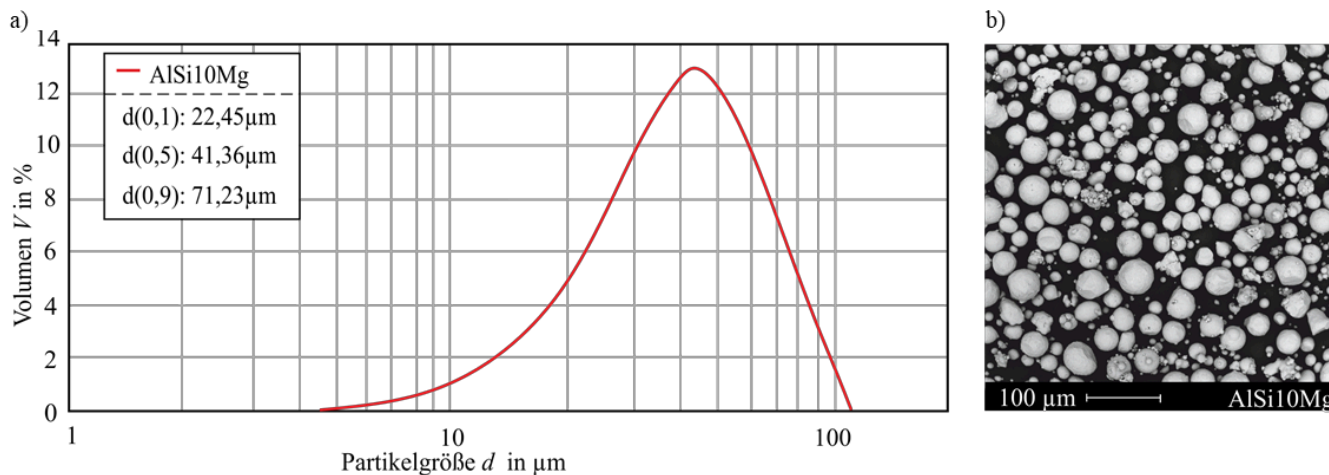
▼ Figura 2: Portamozzo con strutture di supporto

cliente può richiedere prove non distruttive e/o distruttive sui componenti realizzati e sui provini testimone. I metodi di prova ammessi a tal fine sono elencati nella DIN 65123. La documentazione della commessa deve essere redatta secondo le prescrizioni della DIN EN 9133 e della E DIN EN 9130. Per una documentazione sufficiente occorre documentare almeno le seguenti informazioni: disposizione e tipo delle strutture di supporto, disposizione del componente nella camera di costruzione, disposizione e posizionamento dei singoli componenti, polvere impiegata, piattaforma di costruzione utilizzata, gas di protezione utilizzato, le informazioni riportate nelle istruzioni di produzione e il numero di produzione [10].

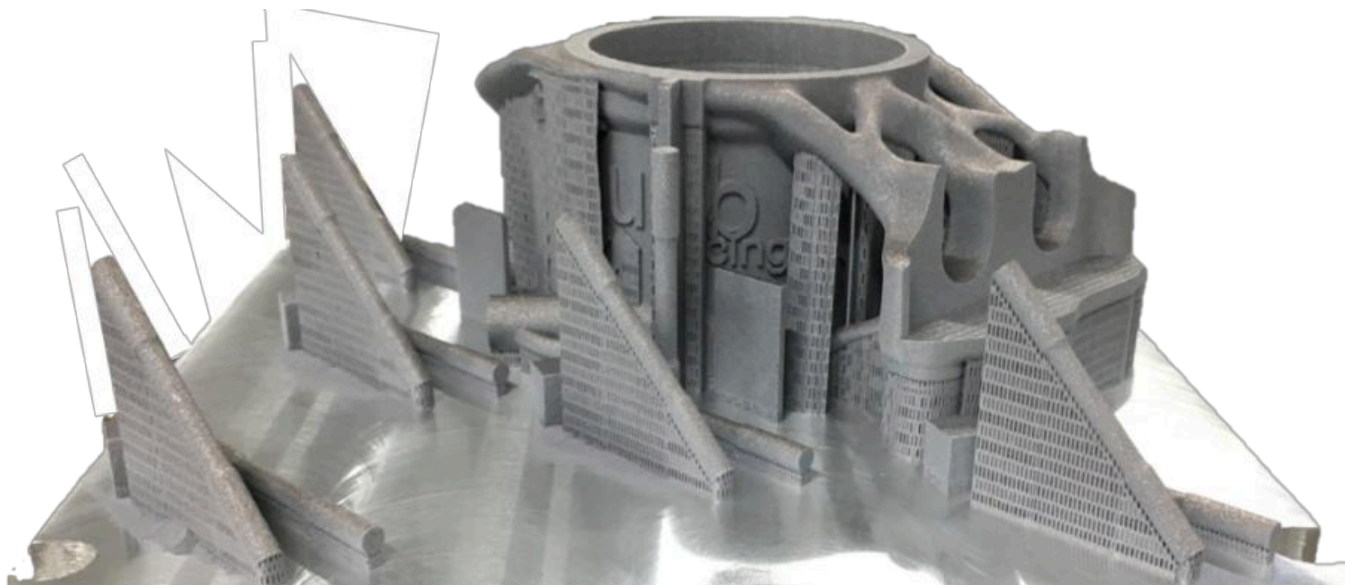
Validazione del procedimento su un portamozzo realizzato mediante fusione laser

Prima di poter avviare la produzione vera e propria del portamozzo mediante fusione laser selettiva (SLM), occorre effettuare la preparazione dei dati di costruzione. In questa fase il modello 3D CAD del portamozzo viene dotato delle opportune strutture di supporto (figura 2). Il tipo di strutture scelte e l'orientamento del portamozzo nella camera di costruzione vengono documentati ai fini della riproducibilità e il job di costruzione creato viene salvato.

Nella fase successiva occorre determinare le proprietà della polvere da utilizzare. In questo modo si può garan-



▼ Figura 3: Visualizzazione delle grandezze d'influenza rilevanti della polvere – a) distribuzione granulometrica media della lega AlSi10Mg, b) immagine al microscopio elettronico a scansione della polvere AlSi10Mg



▼ Figura 4: Validazione del concetto di assicurazione qualità su un portamozzo realizzato mediante fusione laser del Direct Manufacturing Research Center dell'Università di Paderborn

tire che vengano svolti controlli di qualità regolari sulla polvere e che questa sia idonea alla lavorazione mediante il processo SLM. In questo contesto, per la polvere AlSi10Mg impiegata si determina innanzitutto la distribuzione granulometrica media (figura 3a). La distribuzione granulometrica presenta un andamento approssimativamente normale.

Inoltre, l'immagine al microscopio elettronico a scansione della figura 3b mostra che le singole particelle di alluminio hanno una struttura sferica e presentano poche adesioni sotto forma dei cosiddetti satelliti.

L'umidità della polvere AlSi10Mg, misurata in aggiunta con un analizzatore di umidità a infrarossi, è pari allo 0,24%.

Nel complesso la polvere presenta buone proprietà e consente di depositare uno strato di polvere omogeneo. Per la deposizione dello strato di polvere si utilizza una lama in acciaio, adatta al materiale lavorato, che distribuisce la polvere su una piastra di costruzione in alluminio. Per garantire una distribuzione il più possibile uniforme della polvere lungo la geometria del componente, il componente viene posizionato con un angolo di 45° rispetto alla direzione di ricopertura. Inoltre, anche i provini necessari per l'esecuzione delle misure di assicurazione qualità vengono orientati sulla piastra di costruzione secondo la VDI 3405 (figura 4).

Al termine della costruzione, la polvere in eccesso viene rimossa dalla camera di costruzione con un set di utensili specifico per il materiale e i componenti realizzati

vengono separati dalla piastra di costruzione con una sega a nastro. Seguono quindi la rimozione delle strutture di supporto e il trattamento superficiale.

Nella fase successiva si esegue un esame visivo del componente.

Questo controllo ottico serve a individuare il prima possibile eventuali difetti del componente, prima di avviare ulteriori fasi di post-lavorazione e di assicurazione qualità. A supporto di questo processo di controllo si può utilizzare un calibro per rilevare gli scostamenti dimensionali.

Dopo l'esame visivo, i residui di supporto ancora presenti vengono rimossi dal portamozzo, le superfici funzionali vengono ripassate con la rettifica e il componente viene nuovamente sabbiato. Concluse le fasi di post-lavorazione, si prosegue con il processo di assicurazione qualità. In questo contesto si esegue innanzitutto sul portamozzo un controllo con liquidi penetranti secondo la ISO 3452, per evidenziare ad esempio cricche o una porosità elevata sulla superficie del componente (figura 5).

Dopo che il liquido penetrante è penetrato negli eventuali difetti superficiali, il colorante in eccesso viene rimosso con un detergente speciale. Successivamente si applica il rivelatore, che per effetto capillare estrae il liquido penetrante rimasto nelle discontinuità. Si forma così una macchia di colore bidimensionale che fornisce indicazioni su eventuali difetti. Come si vede nella figura 5, il portamozzo esaminato è privo di difetti superficiali.



▼ Figura 5: Controllo con liquidi penetranti secondo la ISO 3452 sull'esempio di un portamozzo

Soltanto il lato inferiore del portamozzo presenta alcune isolate macchie di colore, riconducibili a una porosità più marcata.

Per valutare meglio le caratteristiche superficiali del portamozzo, insieme al componente vengono prodotti due provini rettangolari ($l = 20 \text{ mm}$, $h = 30 \text{ mm}$, $b = 2 \text{ mm}$) con il medesimo orientamento spaziale; successivamente si esegue una misurazione tattile della rugosità secondo la DIN EN ISO 4287 allo stato as-built e allo stato sabbiato. I valori così determinati mostrano una netta riduzione della rugosità superficiale grazie alla sabbiatura abrasiva. La rugosità media aritmetica R_a è stata infatti ridotta da $23,4 \text{ }\mu\text{m}$ a $5,7 \text{ }\mu\text{m}$ e l'altezza massima media del profilo R_z da $141,0 \text{ }\mu\text{m}$ a $35,6 \text{ }\mu\text{m}$.

I componenti realizzati mediante fusione laser presentano tipicamente una densità relativa superiore al 99% [11]. Per valutare la porosità complessiva del portamozzo, insieme alla struttura vengono prodotti cubetti di riferimento con uno spigolo di 10 mm . I cubetti vengono poi impiegati per la misurazione della densità secondo la DIN EN ISO 3369.

Prima di poter applicare la pesata idrostatica, tuttavia, occorre rimuovere mediante successiva rettifica le strutture di supporto dovute al processo e ridurre al minimo la rugosità superficiale. Se questa fase di lavoro viene trascurata, la successiva pesata nel mezzo di prova può essere falsata da bolle d'aria aderenti.

Ai fini dell'accuratezza statistica, la misurazione della densità viene eseguita su cinque diversi cubetti. Inoltre, la pesata sia in liquido sia in aria viene ripetuta tre volte, in modo da ridurre eventuali imprecisioni di misura calcolando la media aritmetica.

Alla temperatura di prova di 21°C la densità dell'isopropanolo è pari a $0,786 \text{ g/cm}^3$. Come valore di riferimento per la densità del materiale della lega AlSi10Mg si assume $2,67 \text{ g/cm}^3$ [12].

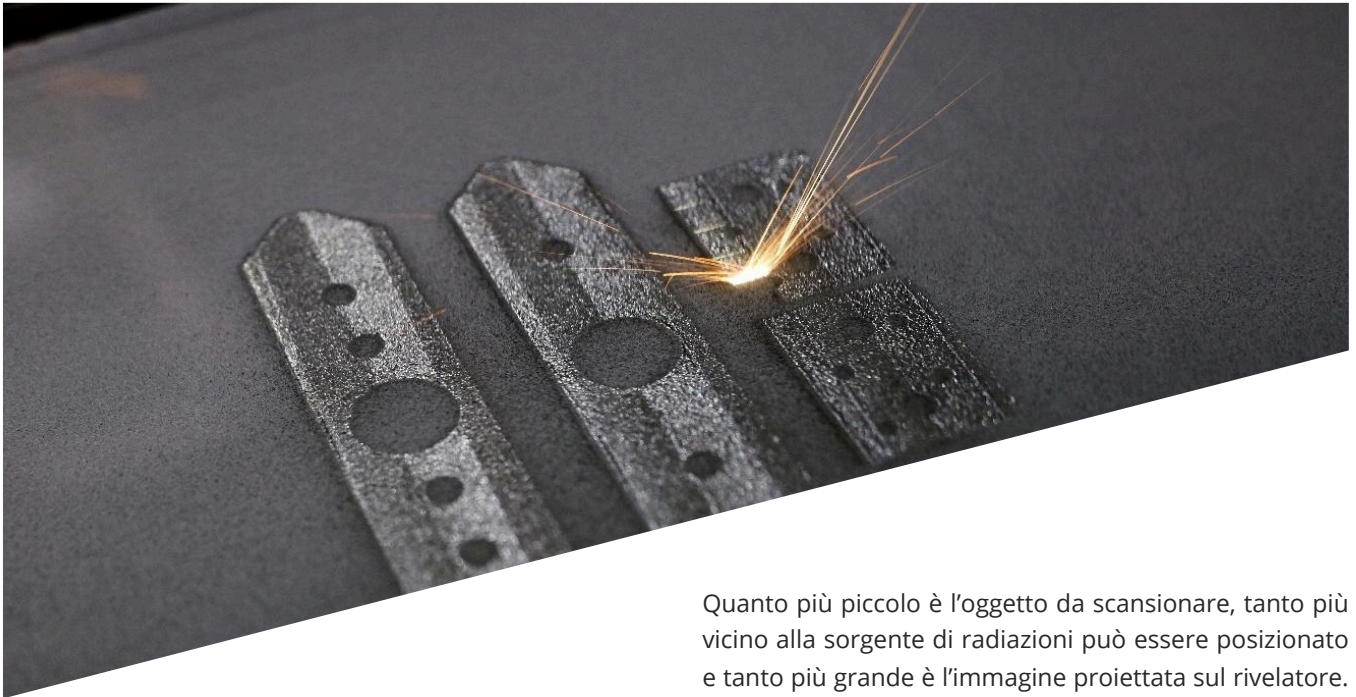
La pesata idrostatica ha mostrato che i valori di densità determinati variano soltanto a partire dalla terza cifra decimale, il che indica una densità dei componenti riproducibile.

Ne risulta quindi un valore medio di $2,66 \text{ g/cm}^3$, da cui deriva per i cubetti una densità relativa del materiale del 99,75%. L'elevata densità relativa dei cubetti può essere considerata rappresentativa del portamozzo, per cui si può presumere un'elevata qualità del componente.

Un ulteriore cubetto prodotto viene impiegato per determinare la durezza del componente. A tale scopo sul cubetto si esegue una prova di durezza secondo il metodo Vickers. Il provino viene prima inglobato in resina epossidica e poi rettificato, in modo da ottenere una superficie di prova liscia e orizzontale. Su questa superficie si esegue quindi la prova di durezza con un carico di prova di $19,61 \text{ N}$ (HV2). Ai fini dell'accuratezza statistica vengono eseguite cinque misurazioni, scartati il valore più alto e quello più basso e calcolata la media dei tre valori restanti. Il valore medio di durezza determinato è pari a circa 107 HV2 .

Oltre alla densità e alla durezza del componente, anche le caratteristiche di resistenza statica del componente rivestono un'importanza significativa. Per determinare le caratteristiche di resistenza, provini testimone sotto forma di sbozzati cilindrici vengono posizionati sulla piastra di costruzione in tre diversi orientamenti secondo la VDI 3405. Dopo il processo di manifattura additiva, i provini vengono torniti alla forma di provino prevista secondo la DIN 50125-B e sottoposti a prova secondo la norma.

Un ulteriore metodo di prova adottato nell'ambito di questo articolo è la tomografia computerizzata (TC). Con l'ausilio della tomografia computerizzata si ottengono informazioni tridimensionali su un componente. A tale scopo l'oggetto da esaminare viene posizionato su una tavola rotante all'interno di uno scanner TC e viene acquisita una moltitudine di proiezioni radiografiche da diverse angolazioni. Le immagini di proiezione vengono



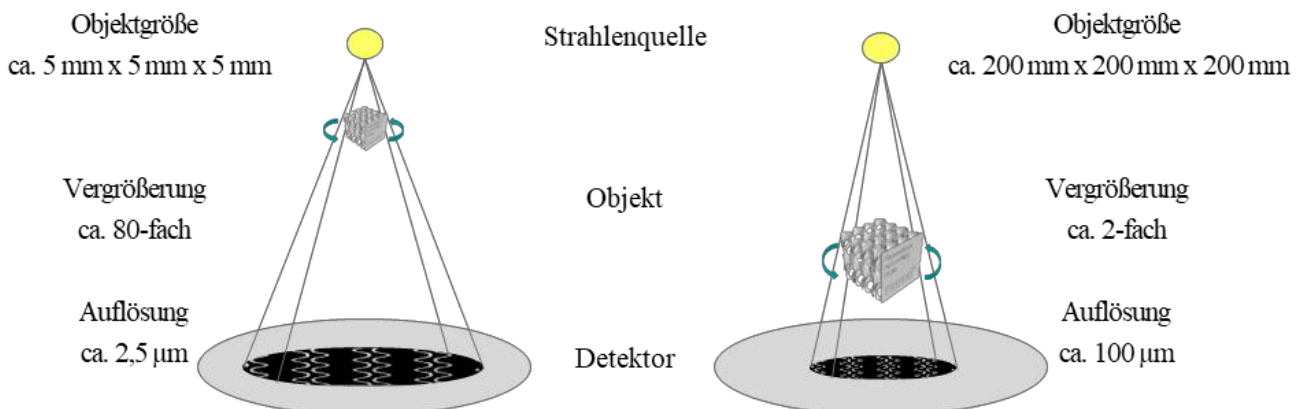
poi elaborate da un sistema di ricostruzione e si genera un'immagine TC tridimensionale. Sulla base delle informazioni ottenute è possibile rilevare scostamenti dimensionali e difetti, anche in componenti complessi. Ogni scansione TC genera i cosiddetti artefatti, che influiscono negativamente sul risultato della scansione. La comparsa di questi artefatti dipende da numerosi fattori. Le grandezze d'influenza più rilevanti sono descritte più in dettaglio di seguito.

Le dimensioni dell'oggetto sono un fattore d'influenza determinante nell'esecuzione di una scansione TC. Le dimensioni dell'oggetto e la risoluzione ottenuta dalla scansione TC sono infatti strettamente interdipendenti (figura 6).

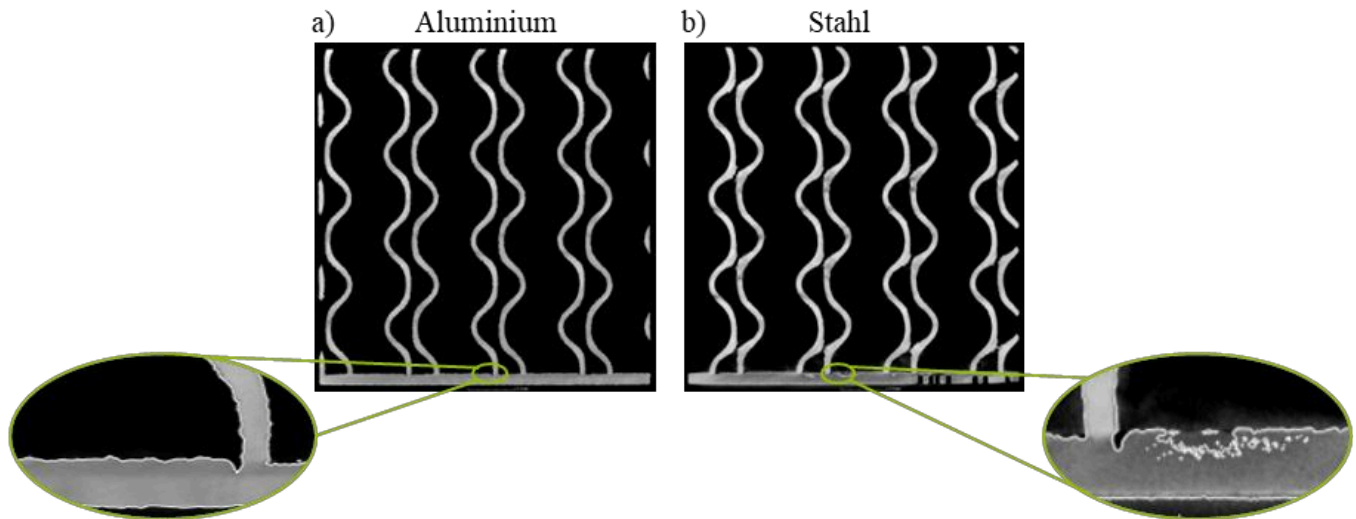
Quanto più piccolo è l'oggetto da scansione, tanto più vicino alla sorgente di radiazioni può essere posizionato e tanto più grande è l'immagine proiettata sul rivelatore. Da questa vengono infine generati i dati di scansione.

Nell'esecuzione di una scansione TC occorre sempre tenere conto dello spessore di parete dell'oggetto. Quanto più massiccia è la sezione da attraversare, tanto più i dati CAD generati si discostano dal componente originale. Occorre sempre considerare che durante la scansione l'oggetto viene ruotato di 360°. Per questo motivo, a seconda dell'orientamento rispetto alla sorgente di radiazioni, il componente può presentare una sezione da attraversare molto ampia. Con geometrie da attraversare di grandi dimensioni gli artefatti aumentano. Nella ricostruzione dei dati, questi artefatti producono un'immagine distorta della realtà.

Un ulteriore fattore che influisce sul risultato o sulla fattibilità stessa della scansione TC è il materiale dell'oggetto. All'aumentare della densità del materiale, la deter-



▼ Figura 6: Dipendenza dalle dimensioni dell'oggetto nella scansione TC



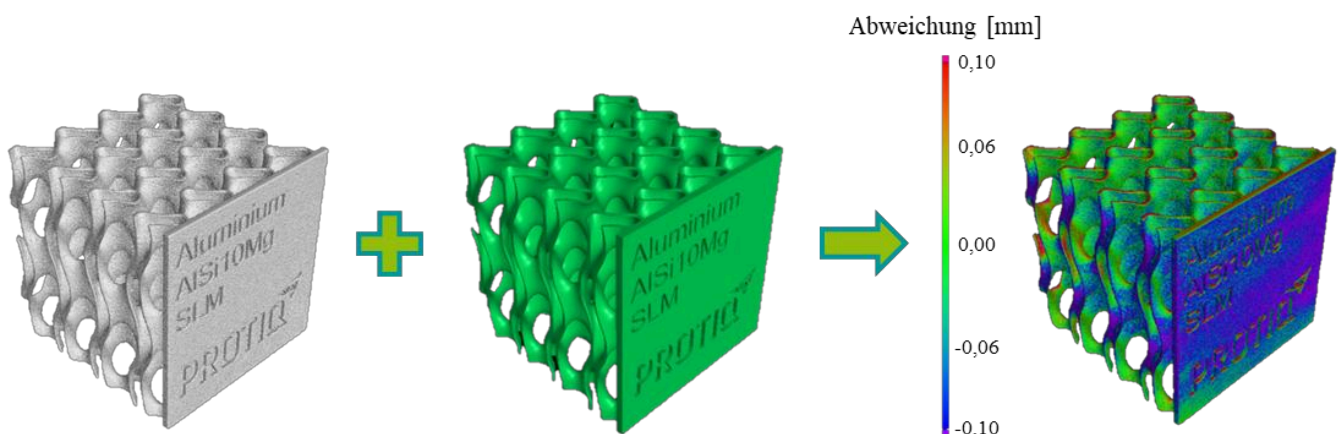
▼ Figura 7: Dipendenza dal materiale nella scansione TC – a) immagine TC di un giroide in alluminio con pochi artefatti, b) immagine TC di un giroide in acciaio con numerosi artefatti

minazione della superficie del componente diventa più difficile. A causa delle elevate densità dei metalli, i limiti fisici della tomografia computerizzata vengono raggiunti rapidamente e gli artefatti di disturbo aumentano. Per illustrare questo effetto, sono stati acquisiti nello scanner TC due giroidi in alluminio e in acciaio realizzati con il processo SLM. La figura 7 mostra in che misura la determinazione della superficie diventa più difficile all'aumentare della densità del materiale.

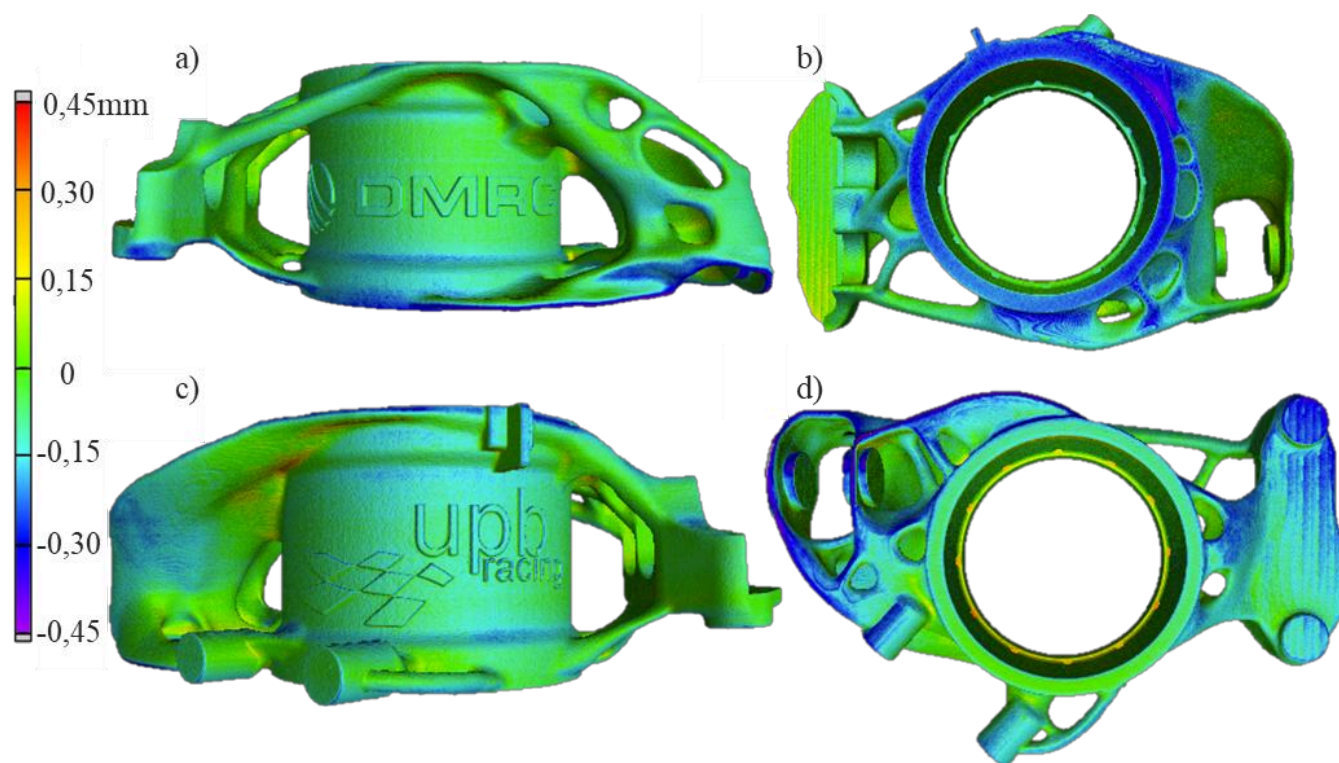
L'immagine della figura 7a mostra una superficie determinata in modo omogeneo, mentre l'immagine della figura 7b presenta numerosi artefatti. Questi artefatti non riproducono le proprietà reali del componente scansionato e falsano quindi il risultato della scansione TC. Per questo motivo, con dati così falsati non sarebbe possibile effettuare un'assicurazione qualità rappresentativa mediante un confronto nominale-reale.

Per realizzare un confronto nominale-reale si generano innanzitutto informazioni tridimensionali su un componente. I dati così ottenuti (dati reali) vengono poi sovrapposti ai dati CAD forniti (dati nominali) secondo una determinata logica di allineamento, il cosiddetto metodo "best fit" (figura 8). Nella fase successiva gli scostamenti presenti vengono rappresentati tramite una mappa a falsi colori. La mappa a falsi colori visualizza in quali zone i dati CAD generati del componente stampato in 3D si discostano dai dati nominali forniti. La tomografia computerizzata consente così di misurare geometrie complesse o anche interne e superfici a forma libera.

La zona verde indica la corrispondenza tra dati nominali e dati reali. Le zone in cui il componente è più grande dei dati nominali sono rappresentate in rosso, mentre quelle in cui il componente è più piccolo dei dati nominali sono rappresentate in blu. La figura 9 seguente visualizza la mappa a falsi colori del portamozzo pro-



▼ Figura 8: Sequenza di un confronto nominale-reale di un giroide realizzato mediante fusione laser



▼ Figura 9: Confronto nominale-reale del portamozzo in alluminio – a) vista frontale, b) vista dall'alto, c) vista posteriore, d) vista dal basso

dotto da quattro diverse viste. La prevalente colorazione verde mostra che il componente presenta solo pochi scostamenti rispetto al modello CAD originale.

In particolare la vista frontale e quella posteriore presentano superfici prevalentemente verdi, per cui si può presumere uno scostamento quasi pari a 0 mm. La maggior parte degli scostamenti si registra nei punti di collegamento al braccio oscillante inferiore. Qui la vista dall'alto mostra uno scostamento prevalentemente compreso tra 0,15 e 0,30 mm, che verso il bordo sale a oltre 0,45 mm. Sul lato inferiore, invece, gli scostamenti sono leggermente minori, pari a 0-0,15 mm. Soltanto le zone di collegamento circolari presentano uno scostamento negativo, riconducibile tuttavia all'asportazione meccanica nel processo di post-lavorazione. Nel complesso, tuttavia, gli scostamenti del portamozzo prodotto sono molto ridotti e rientrano per lo più nel campo di tolleranza indicato dello 0,7% [13].

Conclusioni e prospettive:

Con l'impiego della manifattura additiva per la produzione diretta e senza utensili di prodotti finiti occorre garantire un elevato livello qualitativo. Nell'ambito di queste indagini sono stati scelti, sulla base delle norme vigenti, metodi di prova idonei, applicati a titolo esemplificativo per dimostrarne la trasferibilità alla manifattura

additiva. Sono state esaminate le proprietà della materia prima in polvere, le proprietà del materiale dei componenti costruiti e la precisione geometrica dei componenti. Per poter eseguire anche prove distruttive, in rappresentanza delle proprietà dei componenti sono stati prodotti e sottoposti a prova, all'interno di un job di costruzione, provini secondo la norma VDI3405. [11]

I risultati delle indagini mostrano che, sulla base dei valori caratteristici determinati, è possibile esprimere una valutazione sulla qualità dei componenti ottenuta.

Le irregolarità nel processo di costruzione vengono per lo più rivelate immediatamente dai risultati delle misurazioni.

Grazie al concetto di assicurazione qualità sviluppato è già possibile controllare numerose grandezze d'influenza e definire valori limite. È però emerso chiaramente che, per una produzione affidabile e di qualità costante, è necessaria un'ulteriore ottimizzazione delle macchine e degli impianti. Auspicabile è l'integrazione di ulteriori strumenti di monitoraggio di processo online, come ad esempio la termografia, i sistemi ottici e altri sensori.

Bibliografia

- [1] Som, O.; Thielmann, A.; Schnabl, E.; Daimer, S.; Berghäuser, H.; Rothengatter, O.: Anwendung- und Entwicklungsperspektiven der Additiven Fertigung für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Fraunhofer- Institut für System- und Innovationsforschung, 2016.
- [2] Schleifbaum, J. H.: Verfahren und Maschine zur individualisierten Produktion mit High Power Selective Laser Melting. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [3] Brugger-Gebhardt, S.: Die DIN EN ISO 9001:2015 verstehen. Die Norm sicher interpretieren und sinnvoll umsetzen. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
- [4] DIN EN ISO 9001:2015-11, Deutsches Institut für Normung, Qualitätsmanagementsysteme- Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [5] Behrends, K-U.; Seybold, A.; Lehrke, M.: DIN EN ISO 9001:2015- kompakt und verständlich. Ein Leitfaden für Anwender zum Verstehen der ISO 9001:2015, mit dem Ziel das Bewusstsein und die Eigenverantwortung zu stärken. Lehrke Verlag GmbH, Hamburg, 2016.
- [6] TÜV-Rheinland: Fragen und Antworten zur ISO/TS 16949:2009 und IATF 16949:2016. TÜV-Rheinland Group, Köln, 2017.
- [7] IATF16949:2016-10, International Automotive Task Force, Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktionen in der Automobilindustrie. Qualitäts Management Center (QMC) im Verband der Automobilindustrie, Berlin, 2016.
- [8] DIN EN 9100:2018-08, Deutsches Institut für Normung, Qualitätsmanagementsysteme- Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [9] M. Hinsch: Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie. Die EN 9100:2016 verständlich erklärt, 2^a edizione. Springer Vieweg, Hamburg, 2016.
- [10] DIN 65124:2018-10, Deutsches Institut für Normung: Luft- und Raumfahrt – Technische Lieferbedingungen für additive Fertigung metallischer Werkstoffe mit Pulverbettverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [11] VDI 3405-2:2013-08, Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [12] EOS: EOS GmbH Datenblatt Aluminium AlSi10Mg: URL: https://lightway-3d.de/download/LIGHTWAY_EOS_Aluminium_AlSi10Mg_de_Datenb
- [13] PROTIQ GmbH.: Blomberg, 2019.