



(10) **DE 10 2023 110 189 A1** 2024.10.24

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2023 110 189.7**

(22) Anmeldetag: **21.04.2023**

(43) Offenlegungstag: **24.10.2024**

(51) Int Cl.: **G01B 11/08 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**ai-quanton GmbH, 69514 Laudenbach, DE;
DYNEXA GmbH & Co. KG, 69514 Laudenbach, DE**

Schäfer, Walter, Dr., 69514 Laudenbach, DE

(72) Erfinder:

**Schuller, Vincent, 69514 Laudenbach, DE;
Rapmund, Patrick, Dr., 69514 Laudenbach, DE;
Schwarz, Marcus, Dr., 69514 Laudenbach, DE;**

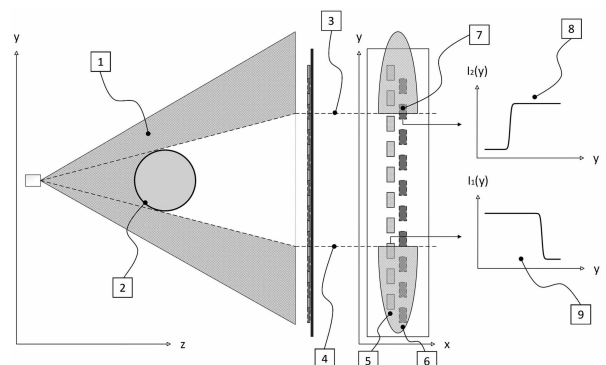
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur kalibrationsfreien Bestimmung des Radius eines beinahe rotationssymmetrischen Körpers mittels Verschattungstechnik**

(57) Zusammenfassung: Das hier beschriebene Messverfahren basiert auf der Verschattungstechnik, welche für die Digitalisierung von beinahe rotationssymmetrischen Bauteilen im laufenden Prozess verwendet wird. Die Genauigkeit des Verfahrens wird durch die Verwendung eines aufgeweiteten Lichtstrahls zur Beleuchtung des Bauteils erhöht, wodurch eine beliebige Vergrößerung des Schattenwurfs erreicht werden kann. Die Grenzen des vergrößerten Schattenwurfs werden mittels eines unstetigen Zeilendetektors vollständig erfasst, um daraus den Radius/Durchmesser des Bauteils zu berechnen. Anschließend werden die Störparameter eines rotierenden Systems durch Drehung des Bauteils bestimmt und rechnerisch korrigiert. Überdies zeigen sich die Vorteile des Verfahrens insbesondere darin, dass eine Lichtquelle ohne aufwendige Strahlführungsoptik - wie im Falle einer telezentrischen Lichtquelle - eingesetzt wird.

Zum Stand der Technik in der Radius/Durchmessermessung (Filament Winding Prozess) gibt es mehrere Vorteile. Die berührungslose Messung mittels Verschattungstechnik:

- ermöglicht eine höhere Mess- und Wiederholgenauigkeit
- reduziert die Maschinenstillstandzeiten
- verhindert die Beeinflussung der Messergebnisse durch die Berührung des Bauteils und Handhabung des Messgeräts selbst (z.B. Zug, Maßband aufgelegt)
- ist unabhängig von Schichttype, Schichtanzahl und gestapelter Bauteilwanddicke
- verhindert den negativen Einfluss der Messung auf die Qualität von Faserband und gestapeltem Bauteil (Einschnürung)
- ermöglicht eine durchgängige Digitalisierung des Fertigungsprozesses inklusive möglicher Prognosen und Regemaßnahmen hinsichtlich Abmessungen und Qualitätsparametern des gewickelten Bauteils während seiner Fertigung



Beschreibung

[0001] Einsatzgebiet des hier beschriebenen Verfahrens ist beispielsweise die Faserwickeltechnik (Filament Winding). Im Filament Winding Verfahren werden mit flüssigem Epoxidharz getränkte Faserbänder (Glasfaser, Kohlenstofffasern, Basaltfasern, Kunststoff / Aramidfasern, Naturfasern und Mischungen daraus) in einem generativen Fertigungsprozess Faserband für Faserband und Schicht für Schicht auf rotierende, rotationssymmetrische Wickelwerkzeuge zum späteren Bauteil aufgeschichtet (diese Schichtung ist im Filament Winding auch mit faserverstärkten Thermoplastbändern möglich). Mehrere dieser Schichten übereinander werden als Laminat bezeichnet. Es gibt Schichttypen mit tendenziell eher axialer Orientierung (sog. Kreuzschichten) sowie Schichten mit eher orthogonaler Orientierung (sog. Umfangsschichten) zur Rotationsachse des Wickelwerkzeugs. Faserwahl, Harzsystemwahl und vorliegende Schichttype bestimmen Farb- und Glanzgrad der sich gerade am Außendurchmesser befindenden Schicht. Da sich diese im tropfnassen, wickelrohen Zustand befindet, ist die Topografie dieser äußeren Oberfläche wellig und unregelmäßig, ggf. mit Reinhartzbereichen (keine Fasern brechen hindurch). Erst während und nach einem dem Wickelprozess folgenden Temperprozess reagiert das Epoxidharz chemisch aus und geht dabei vom zunächst flüssigen in den festen Aggregatzustand über.

[0002] Nach jeder Schichtfertigstellung wird der Durchmesser der Schicht, d.h. kontinuierlich und begleitend im Entstehungsprozess des Laminats, geprüft und mit einer Toleranzvorgabe abgeglichen. Die Maßhaltigkeit der hergestellten Bauteile ist insbesondere für den Einsatz in stark begrenzten Bauräumen relevant. Weiterhin ist die Maßhaltigkeit auch ein direktes Indiz für das korrekte Anteilsverhältnis zwischen Fasern und Harz im entstehenden Querschnitt des Laminats, welches entscheidend für die späteren Steifigkeits- und Festigkeitswerte von Schichtwerkstoff und finalem Bauteil ist. Die einzuhaltende Toleranz des Enddurchmessers bewegt sich im Bereich von ca. $\pm 0,2\text{mm}$ bis $\pm 1,5\text{mm}$. Der Toleranzbereich hängt stark vom Nenndurchmesser sowie Bauteil-Anwendungsgebiet und nachgelagerten Verfahren wie etwa einer Oberflächenbeschichtung ab. Zur Kontrolle der Toleranzeinhaltung ist der schichtweise anwachsende Durchmesser mit möglichst hoher Genauigkeit zu erfassen. Die Messgenauigkeit des Messsystems sollte daher den Anforderungen von $\pm 0,05\text{mm}$ genügen. Aus dem gemessenen Durchmesser lassen sich die Wanddicke des entstehenden Bauteils bzw. die Schichtdicke der Schicht berechnen. Bei Maßabweichungen kann durch Änderung der zugeführten Harzmenge und/oder durch Änderung der Aufwickel-Zugspannung des Faserbandes der Durchmesser angepasst werden. D.h. in der Folgeschicht zur gemessenen Schicht wird diese dickwandiger oder dünnwandiger aufgewickelt, um die Maß- und damit auch Eigenschaftsabweichung des entstehenden geschichteten Laminats zu egalisieren.

[0003] Stand der Technik: Die Messung erfolgt taktil und mit undefinierter Anlegekraft durch einen Facharbeiter unter Zuhilfenahme eines manuellen Umfangs-Bandmaßes mit Nonius-Anzeige. Aktuell wird der Produktionsprozess für die Durchführung der Messungen nach jeder aufgewickelten Schicht unterbrochen. Die Messung selbst erfolgt über die axiale Wickel-Gesamtlänge an je drei Punkten (Links, Mitte, Rechts) der entstehenden geschichteten Bauteilrohlinge, dies für jeden der - auch oftmals möglich - zeitgleich bewickelten Wickelkerne auf einer Wickelmaschine. Die Messergebnisse werden manuell protokolliert.

[0004] Weiterhin ist bekannt, dass auch Messschieber mit Nonius-Anzeige für die Messaufgabe im Einsatz sind. Oftmals sind Messschenkel mit verbreiterten Flächen im Einsatz, um ein Einsinken der Schenkel in die tropfnasse, nachgiebige Wickeloberfläche zu verhindern.

[0005] Die aktuelle Messmethodik soll ersetzt werden. Zum einen ist die Genauigkeit dieser Messmethode zu hinterfragen. Das Umfangsbandmaß selbst weist eine Ablesegenauigkeit von $\pm 0,1\text{mm}$ auf, ein Messschieber $\pm 0,05\text{mm}$. Allerdings kann diese Genauigkeit in der Realität im aufgezeigten Vorgang nicht erreicht werden:

Einflüsse wie die Lichtverhältnisse in der Werkhalle und Standort der Wickelmaschine, der Ablesewinkel mit möglicher Parallaxe, Harzverschmutzungsgrad der mechanischen Messmittel und insbesondere die Anlegekraft verringern die Genauigkeit. Notwendiges Anlegen und Zusammenziehen des Umfangs-Bandmaßes führen zu einer nicht überwachten Einschnürung des Halbzeugs in Abhängigkeit der aufgewendeten Zugkraft (ähnlich beim Messschieber). Es kommt zu einer Differenz der gemessenen Durchmesser bei losem Anlegen mit geringem Zug und bei festem Zuziehen auch noch über der Schichtanzahl. Je höher die gestapelte Schichtanzahl, umso höher ist die radiale Nachgiebigkeit der geschichteten Wandung: bei gleicher Messkraft ist die Einschnürung höher. Dieser Trend wird durch Umfangslagen im Stapelprozess der Schichten unterbrochen. Grund hierfür ist der erhöhte Anpressdruck bei der Aufbringung der Faserbänder mit dieser Orientierung. Der Effekt der manuellen Komprimierung des Halbzeugs durch die z.B. Umfangs-Bandmaßmessung des Facharbeitenden weist hierbei

einen geringeren Einfluss auf als bei der gleichen Messmethode auf einer gerade gestapelten Kreuzlage.

[0006] Zum anderen ist der Einfluss dieser manuellen Kontaktmessung auf die spätere Bauteilqualität zu betrachten. Eine Einschnürung des aufgewickelten Materials auf den Auflagestellen des z.B. UmfangsBandmaß und der Zugkraft zur Messung auf dem tropfend nassen Laminat ist möglich. Da die Maschine während der manuellen Messung nicht verfährt reduziert der Vorgang die Produktivität und erhöht die Herstellkosten.

[0007] Bei stärkerer Abweichung zu den Durchmesser-Soll-Werten kommt es auch vor, dass das Faser-Harz-Anteilsverhältnis bei Bedarf im Soll angepasst werden muss und während des laufenden Prozesses darüber entschieden wird, ob die mechanischen Eigenschaften des Schichtwerkstoffs und des entstehenden Bauteils damit noch ausreichend sind (digitaler Zwilling).

[0008] Die Verschattungstechnik, die in der vorliegenden Erfindung eine zentrale Rolle spielt, ist der Menschheit spätestens seit der Erfindung der Sonnenuhr bekannt und wird direkt oder indirekt in vielen industriellen Anwendungen eingesetzt. Die Verschattungstechnik ermöglicht es, die geometrischen Eigenschaften eines Objekts anhand des von ihm geworfenen Schattens zu bestimmen.

[0009] Eine breite Anwendung in der Industrie findet die telezentrische Verschattungstechnik, um den Radius und Durchmesser zu bestimmen. Dabei wird entweder der gesamte Körper ausgeleuchtet oder seine Ränder. Wird die telezentrische Verschattungstechnik für große Bauteile eingesetzt, muss in der Regel die Lichtquelle und der Detektor für die Randmessung verschoben werden. Dadurch hängt die Messgenauigkeit mit der mechanischen Genauigkeit der Verschiebung zusammen. Außerdem muss die Parallelität in der telezentrischen Anordnung bei der Verschiebung gewährleistet werden. Das ist in einer industriellen Umgebung nicht immer möglich.

[0010] In der vorliegenden Erfindung wird die Verschattungstechnik mit einem divergenten Lichtstrahl angewendet. Die Erzeugung eines divergenten Lichtstrahls ist im Vergleich zu einem Lichtstrahl aus der telezentrischen Anwendung der Verschattungstechnik leichter, die Lichtquelle eines divergenten Lichtstrahls benötigt weniger Bauraum und ist bei der Herstellung deutlich günstiger. Mit einem divergenten Strahl lassen sich Bauteile mit einem breiten Durchmesserspektrum komplett ausleuchten, wohingegen der parallele Lichtstrahl in der telezentrischen Anwendung größer als der Durchmesser des zu untersuchenden Objektes sein muss.

[0011] Die Verschattungstechnik wird aktuell beispielsweise bei der Sichtprüfung eingesetzt. Durch das Ausleuchten mit einem divergenten Lichtstrahl wird das Bild des Schattenwurfs in der Regel stark vergrößert. Aufgrund der resultierenden Größe des Schattenwurfs, können in vielen Fällen die Bilder nicht im Maßstab 1:1 digitalisiert werden. Wird das Bild mit einer Verkleinerungsoptik digitalisiert, beispielsweise abgefilmt, verschwinden die Vorteile der divergenten Verschattung.

[0012] Die Vergrößerung des Schattenwurfs führt zu einer gewünschten Erhöhung der Genauigkeit bei der Radius- und/oder Durchmesserbestimmung. Im darauffolgenden realen Applikationsbeispiel wird deutlich, dass für die Charakterisierung eines rotationssymmetrischen Körpers mit einem Durchmesser von 400mm eine Digitalisierung eines Schattenwurfs mit einer Breite bis zu 1000mm notwendig wird. Durch Variation der Abstände innerhalb des Systems (Lichtquelle zu Objekt zu Sensoreinheit) ändert sich die Messgenauigkeit und kann an die jeweilige Anwendung sowie die dort notwendige Genauigkeit angepasst werden.

[0013] Wäre die Rotationsachse (x_R , y_R) des rotationssymmetrischen Körpers ohne Dezentrierung ($r_R=0$) und mit dem Radius R in den Koordinatenursprung $(0, 0)$ und die Lichtquelle mit dem divergenten Lichtstrahl bei $(x_Q, 0)$ und die Beobachtungsebene bei $(x_D, 0)$ fest, so sei die Breite des Schattenwurfs d_S durch nachfolgende Beziehung gegeben:

$$d_S(x_Q, x_D, R) = \frac{2(x_D - x_Q)}{\sqrt{\left(\frac{x_Q}{R}\right)^2 - 1}}$$

[0014] In der Tabelle sind exemplarisch die Werte aus der oberen Gleichung für eine reale Applikation berechnet:

Position der Lichtquelle	Position der Beobachtungsebene	Radius des rotationssymmetrischen Körpers	Breite des Schattenwurfs
$x_Q = -300\text{mm}$	$x_D = 300\text{mm}$	$R = 50\text{mm}$	$d_S = 202\text{mm}$
$x_Q = -300\text{mm}$	$x_D = 300\text{mm}$	$R = 100\text{mm}$	$d_S = 424\text{mm}$
$x_Q = -300\text{mm}$	$x_D = 300\text{mm}$	$R = 200\text{mm}$	$d_S = 1073\text{mm}$

[0015] Je größer der Abstand zwischen der Lichtquelle und der Beobachtungsebene ist, desto größer ist die Breite des Schattenwurfs. Das Gleiche gilt auch für den Radius. In einem realen Fall für die exakten Durchmesserbestimmung müssen zusätzlich die so genannten Störparameter wie Dezentrierung (r_R), Verschiebung der Rotationsachse (x_R , y_R), Verschiebung der Lichtquelle (x_Q , y_Q) sowie der Beobachtungsebene (x_D) herangezogen werden.

[0016] Es wird erkannt, dass die Radien und entsprechend die Breite des Schattenwurfs in einem großen Bereich variieren. Um den gesamten Schattenwurf zu messen, wird ein großer Detektor mit einer Länge bis zu 1000mm benötigt. Ein geeignetes System hierfür ist ein Zeilendetektor.

[0017] Es existieren keine monolithischen Detektoren, die großflächig und mit einer ausreichenden Genauigkeit einen so großen Schattenwurf messen können. Um diese Herausforderung zu überwinden, wird in der vorliegenden Erfindung ein unbeschränkter unstetiger Zeilendetektor vorgestellt.

[0018] Ein unstetiger Zeilendetektor besteht aus mindestens einer oder mehreren räumlich versetzten und in ihrer Gesamtheit stetigen unbeschränkt langen Reihen einzelner Zeilendetektoren. Wobei jeder einzelne Zeilendetektor aus stetig aneinandergereihten Sensorzellen besteht und die kommerziell bereits breit eingesetzt werden. Unter den Begriff Zeilendetektor fällt beispielsweise eine Zeilenkamera.

[0019] Um die bauartbedingten Lücken (d_{Cy}) zwischen den einzelnen Zeilendetektoren zu kompensieren, müssen diese überlappend angeordnet werden (siehe **Abb. 2**). Beispielsweise in zwei lateral zueinander versetzten Reihen mit dem Abstand d_{Cx} , sodass die Lücke zwischen den Zellen der einen Reihe durch die Zellen der benachbarten Reihe abgedeckt wird. Um diesen Effekt zu erzielen, sind weitere Anordnungsmuster denkbar (siehe **Abb. 3**).

[0020] Um die Schattengrenze stetig mit einem unstetigen Zeilendetektor zu erfassen, muss der divergente Laserstrahl so breit (z.B. größer als $(d_{Cx} + 2 \cdot d_{Zx})$) sein, dass eine lückenlose Detektion der Schattengrenze gewährleistet wird (siehe **Abb. 2**).

[0021] Wenn die Schattengrenzen gemessen sind, kann daraus der Radius des Objektes abgeleitet werden. Im Falle eines idealen rotationssymmetrischen Körpers kann sein Radius ohne weiteres bestimmt werden. Für die Durchmesserbestimmung eines beinahe rotationssymmetrischen Körpers kann auch nur eine Schattengrenze genutzt werden, wobei eine Kalibrierung notwendig ist.

[0022] Wenn zwei Schattengrenzen gemessen werden, können unter anderen auch die Störparameter bestimmt werden. Dafür müssen die Koordinaten der Lichtquelle und des unstetigen Zeilendetektors bekannt sein.

Patentansprüche

Diese Erfindung betrifft ein Verfahren zur kalibrationsfreien Bestimmung des Radius eines beinahe rotationssymmetrischen Körpers (folgend: siehe jeweils **Abb. 1**; hier Nummer 2) mittels der Verschattungstechnik und einer Vorrichtung bestehend aus einem unstetigen Zeilendetektor (5)(6) welcher aus einer oder mehreren, räumlich versetzten und in ihrer Gesamtheit stetigen unbeschränkt langen Reihen einzelner Zeilendetektoren zusammengesetzt ist, sowie einer Lichtquelle welche einen in der langen Achse divergenten und in der kurzen Achse teilweise kollimierten Lichtstrahl (1) emittiert. Die Vorrichtung ist so konstruiert, dass die obere (3) und/oder untere Schattengrenzen (4) des ausgeleuchteten Körpers stetig und eindeutig mit variierendem Radius des beinahe rotationssymmetrischen Körpers erfasst und für die Berechnung des Durchmessers/Radius in Bezug auf die Rotationsachse herangezogen wird. Für die Berechnung des mittleren Durchmessers eines beinahe rotationssymmetrischen Körpers ist dabei mindestens eine vollständige Umdrehung des Körpers im Messbereich oder der gesamten Messeinheit um die Rotationsachse des Kör-

pers notwendig, wohingegen für die Berechnung des Durchmessers eines idealen rotationssymmetrischen Körpers keine Drehung im Messbereich notwendig ist.

Ein in y-Richtung stark divergierender und in x-Richtung leicht kollimierter Lichtstrahl (**Abb. 1**, Nummer 1) leuchtet einen rotierenden Körper (2) aus. Dabei entsteht eine Schattenprojektion mit zwei Schattengrenzen (3) und (4). Der Lichtstrahl ist in x-Richtung so kollimiert, dass die Reihen der einzelnen Detektoren (5) und (6) in der x-Richtung vollständig ausgeleuchtet wären, wenn kein rotierender Körper (2) vorhanden wäre. Die Schattengrenzen (3) und (4) werden von mindestens einem einzelnen Detektor (7) erfasst. Jeder einzelne Detektor liefert einen Intensitätsverlauf über die Position. Für die Positionsbestimmung der Schattengrenzen (3) und (4) werden nur die einzelnen Detektoren (7) herangezogen, welche eine signifikante Veränderung im Intensitätsverlauf aufweisen. Aus dem Intensitätsverlauf der oberen Schattengrenze (8) und der unteren Schattengrenze (9) lassen sich die Positionen der Schattengrenzen berechnen.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Abbildung 1

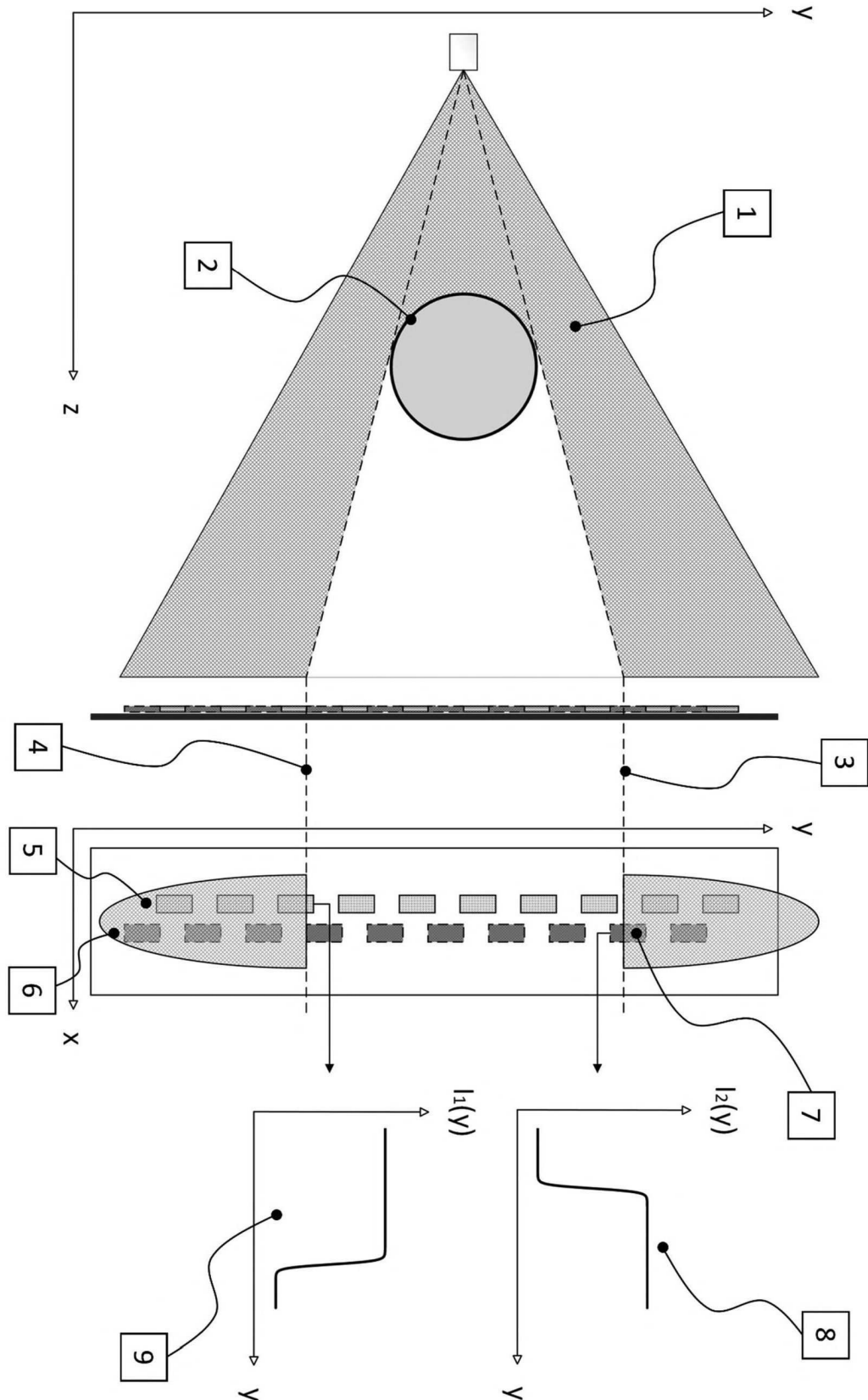


Abbildung 2

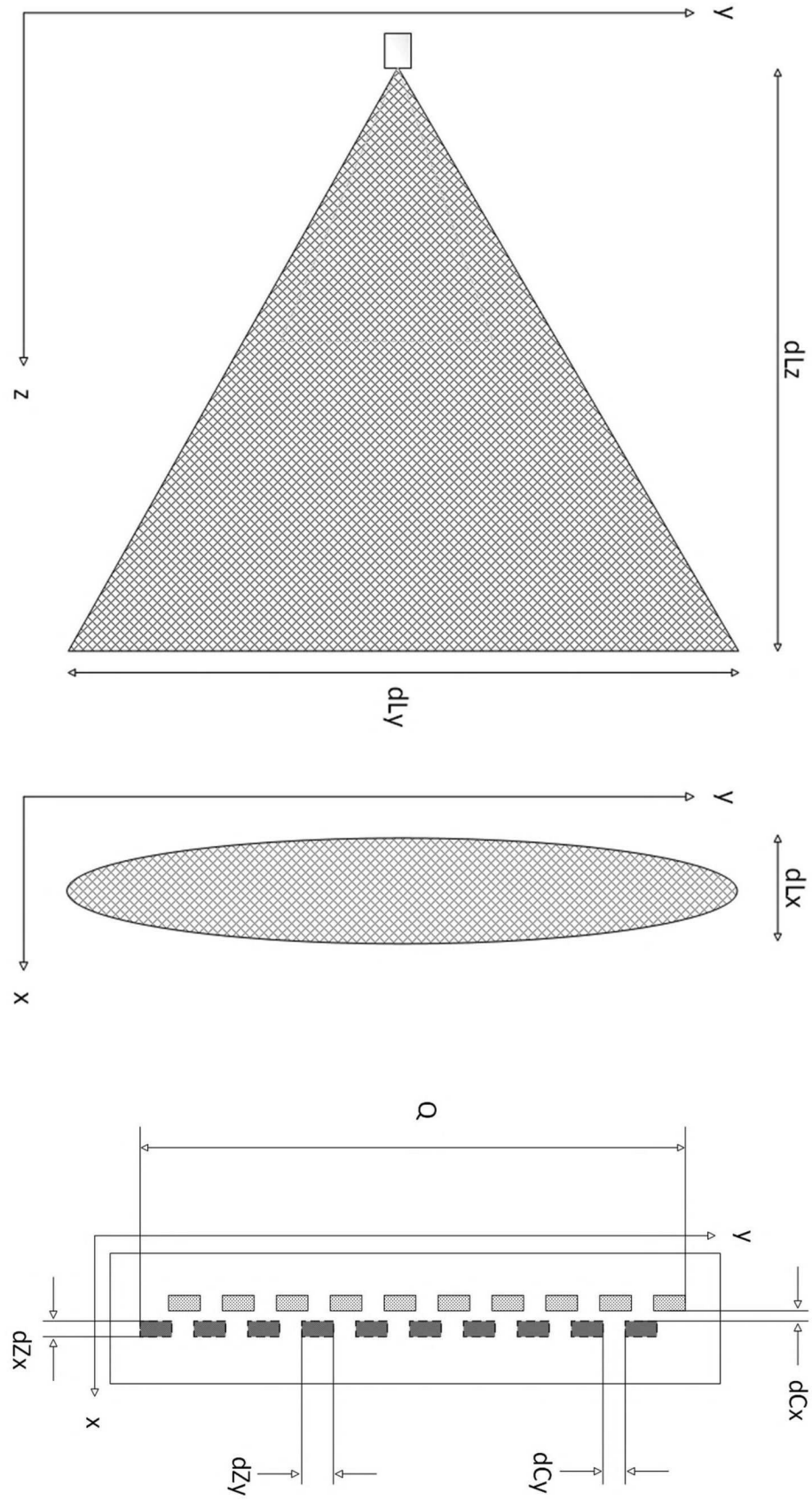


Abbildung 3

