Dauerläufer für die Kurzstrecke

Langlebige LVDT-Sensoren messen kleinste Wege hochpräzise

LVDT in der stereotaktischen Chirurgie © Adobe.Stock 249880233

Im Bereich Medizin- und Aerospace wird häufig ein induktives Wegmess-Verfahren mit LVDT als eine ideale Methode zur kontaktlosen Messung kleinster Bewegungen bis 50 mm verwendet. LVDT-Sensoren erfordern nur wenig Einbauraum, gewährleisten eine sehr hohe Genauigkeit und sind auch unter extremen Umgebungsbedingungen einsetzbar. Sie arbeiten verschleißfrei, sodass ihre Standzeiten bei richtigem Einbau die Gesamt-Lebensdauer vieler Anlagen übertreffen. Und auch bei kleinen Wegen bietet die LVDT-Technologie exzellente Wiederholgenauigkeiten.

LVDT

Linear variable Differential-Transformatoren (LVDT) sind analoge Sensoren, die Bewegungen und Positionen über einen frei beweglichen Stößel oder Taster im Sensorgehäuse erfassen, wo er die Induktivitäten darin verbauter Spulen beeinflusst. Mit der direkten Umwandlung physikalischer Größen – auftretender Kräfte und Momente – in messbare Wegstrecken eignen sich LVDT-Sensoren für ein sehr breites Anwendungsspektrum. In der Medizinanwendung wird die Wiederholgenauigkeit geschätzt, in Aerospace-Anwendungen die Lebensdauer und das Gewicht (Kernverlängerungen können aus Teflon statt Stahl implementiert werden).

Spulen als Herz der LVDT-Sensoren

Die Spulen, also die Hauptbestandteile jedes LVDT-Sensors, werden in der Regel um ein hohles Rohr aus wärmebeständigem Polymer-Fiberglas gewunden, gegen Feuchtigkeit gekapselt und mit einer hochpermeablen magnetischen Schirmung ummantelt. Da die Sensorkonstruktion sehr kompakt ist, ist die Herstellung der Geräte Präzisionsarbeit. Diese ist nicht zu unterschätzen. Speziell ausgebildete und zertifizierte Spezialisten wickeln und löten die streichholzdünnen Spulen unter dem Mikroskop. Je nach Wickeltechnik werden damit unterschiedliche erforderliche Linearitäten und Eigenschaften erreicht, um die Sensoren genau auf die Bedürfnisse der Kunden auszulegen.

Unterschätzte Genauigkeit

Nach wie vor werden aus Unkenntnis häufig LVDT für zahlreiche Anwendungen gar nicht erst in Betracht gezogen – unter der irrigen Annahme, bei diesen Sensortypen sei keine ausreichende Linearität gegeben oder die „Genauigkeit“ unzureichend. Jedoch ist gerade ein LVDT prädestiniert, um kleinste Bewegungen hoch aufgelöst zu erkennen. Das LVDT-Messprinzip hat seine Vorteile bei kleinsten Differenzbewegungen und hat eine hervorragende Wiederholgenauigkeit.

Auf dem LVDT-Anbietermarkt gibt es zwei Arten von Anbietern: Standardsensoren nach Katalogspezifikationen und einige wenige Anbieter, welche die Spezifikationen an die Anwendung anpassen können. Bei angepassten oder kundenspezifischen Versionen ist es wichtig, immer mit dem Hersteller zusammenzuarbeiten. Der Sensorlieferant muss die Anwendung verstehen.

Das bekannteste Qualitätskriterium ist die Linearitätsabweichung, welche eigentlich die Nichtlinearität eines Sensors darstellt. An sie werden oft sehr hohe Ansprüche gestellt, obwohl sogar die Linearität nicht einheitlich geregelt ist. Generell stellt die Linearität die Abweichung der Messwerte zu einer unterschiedlich bestimmten Referenzgeraden dar (Bild 1).

Drei differierende Linearitäten

Die Berechnungsgrundlage der Linearität hängt stark vom Anwender ab. So gibt es zum Beispiel in der Literatur drei differierende Linearitäten. Die Absolute Linearität, die Unabhängige Linearität und die Anschlussbezogene Linearität. Jede darf als Linearität bezeichnet werden, wobei sich diese drei Berechnungsformen teilweise bis zu 50 % unterscheiden können. Daher ist es wichtig das Kunde und Lieferant die gleiche Definition verwenden.

Trägt man die Fehler bezogen auf den Messweg zwischen tatsächlichen Messpunkten und den zugehörigen Referenzpunkten für alle drei Linearitäten in ein Diagramm ein, erhält man folgende Übersicht (Bild 2).

Anhand dieser Übersicht kann erkannt werden, dass die Absolute Linearität in diesem Beispiel Werte von ca. +1,75 % und -0,5 % aufweist, die Anschluss-bezogene immerhin noch Werte von ca. +1,5 % und -0,5 %. Bei der unabhängigen Linearität liegen diese Werte bei ca. +0,72 % und -0,9 %.

Dadurch kommt es, dass die Absolute Linearität in diesem Beispiel bei ca. 1,75 % liegt, die Anschluss-bezogene Linearität bei ca. 1,5 % und die Unabhängige Linearität bei nicht einmal 1 %.

Daher wird bei Datenblättern gerne auf die unabhängige Linearität zurückgegriffen, da diese Werte „besser aussehen“. Die Nachvollziehbarkeit für den Kunden ist allerdings bei der Absoluten Linearität besser gegeben. Im Zweifelsfall sollte der Hersteller Auskunft geben. Durch Abgleich kann bei einem LVDT die absolute Linea-

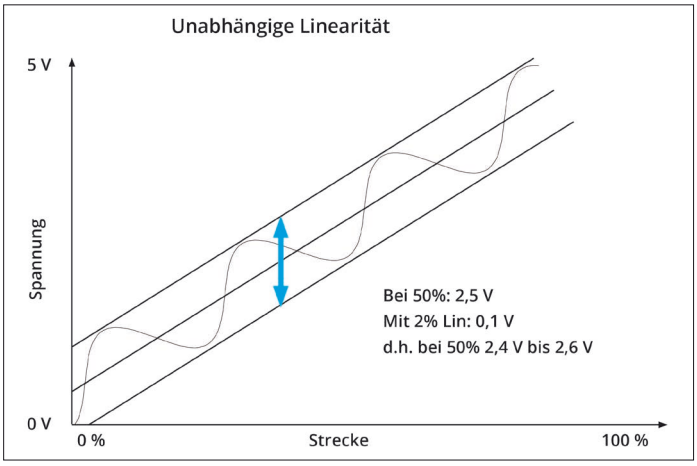

Bild 1: Unabhängige Linearität © Inelta

Autor:
Reinhard Koch,
Vertriebsleiter der
Inelta Sensorsysteme deren
Schwesterfirmen PiL Sensoren
und Vypro s.r.o
Inelta Sensorsysteme
www.inelta.de

ritätsabweichung der unabhängigen Linearität angenähert werden.

Verfahrweg und Messweg

Hierzu kommt nun noch die Tatsache, dass laut Norm der Bereich zum Berechnen der Linearität bei Wegsensoren, unabhängig von der Technologie des Sensors, nicht mit dem gesamten Verfahrweg identisch sein muss. Das bedeutet, dass ein Hersteller zum Beispiel von beiden Enden bis zu 20 % wegschneiden darf und die Linearitätsberechnung auf nur 60 % des Verfahrweges reduziert. Seriöse Hersteller sprechen von zwei unterschiedlichen Messbereichen, dem Verfahrweg und dem Messweg. Der Messweg ist je nach Anwendung parametrierbar (Bild 3).

LVDT ist hysteresefrei

Des Weiteren könnte ein System eine einwandfreie „Linearität" (für Kunde und Hersteller) haben, das System hat aber trotzdem beim Hinweg einen anderen Wert als beim Rückweg. Daher wäre es für diesen Kunden wichtiger, von der Hysterese zu sprechen, als von der Linearität. Dieses Problem tritt bei vielen Sensortypen auf, jedoch ist ein LVDT hysteresefrei. Und damit wird der LVDT die damit zusammenhängenden Probleme der Hysteresefehler, der Wiederholgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit nicht aufweisen.

Definition Hysteresefehler:

Ein Hysteresefehler ist der Distanzunterschied zwischen zwei aus verschiedenen Richtungen angefahrenen Referenzpunkt. Das Ausgangssignal schwankt um den gemessenen Schaltpunkt. Ein LVDT ist hysteresefrei.

Definition Wiederholgenauigkeit:

Es wird das Ausmaß der Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen wiederholter Messungen mit der gleichen Messgröße unter gleichen Bedingungen gemessen. Ein LVDT ist wiederholgenau.

Definition Reproduzierbarkeit:

Es wird die quantitative Angabe der Abweichung voneinander unabhängiger Messwerte angegeben, die unter gleichen Bedingungen ermittelt werden. Ein LVDT liefert reproduzierbare Werte.

Für den Anwender stellt sich häufig das Problem bei kurzen Messwegen, dass die Addition der oben aufgeführten möglichen Fehler zu unerwünschten Ungenauigkeiten führen. Je kürzer der Messweg, je höher die Anforderungen umso mehr addieren sich mögliche Fehlerquellen. Hier spielt ein LVDT-Wegsensor bei Weglängen von 1 mm bis 400 mm seine Stärken voll aus. Messungen sind mit der Präzision von Mikrometern möglich. Lackdichten zum Beispiel können sie mühelos hochpräzise erfassen.

Überlegene physikalische Eigenschaften

LVDT-Sensoren sind in zahlreichen industriellen Anwendungen mit hohen Anforderungen an Präzision und Ausfallsicherheit vor allem deshalb eine optimale Lösung, weil sie entscheidende Vorzüge gegenüber anderer Sensorik bieten. So ermöglicht zum Beispiel das absolute Messprinzip auch nach Unterbrechungen der Spannungsversorgung zuverlässig die Bestimmung der Sensorposition – in vielen Anwendungen ein wichtiger Aspekt. Anders als z. B. ein inkrementeller Sensor muss ein LVDT nicht stets nach dem Einschalten eine Referenzmarke anfahren. Im Gegensatz zu Linearpotentiometern, die auf mechanischem Kontakt basieren, sind LVDT-Sensoren berührungslos.

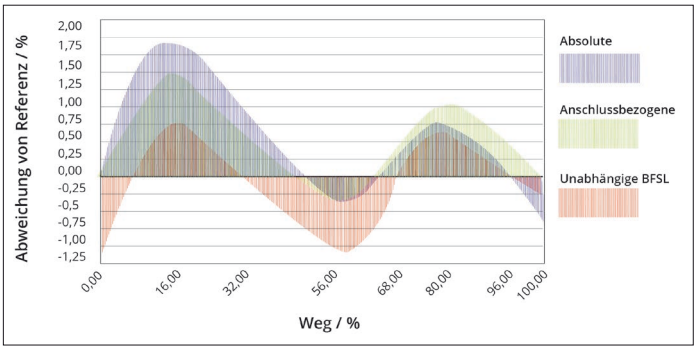

Bild 2: Linearitätsarten © Inelta

Berührungslose Messung

Die induktive Messwertübertragung erfolgt berührungslos und praktisch verschleißfrei. Im Sensor entsteht je nach Bauform keine oder nur sehr geringe mechanische Reibung, sodass die theoretisch unbegrenzte Auflösung nur durch das Rauschverhalten des Messkreises eingeschränkt wird. Diese Eigenschaft bildet auch die Grundlage für eine herausragende Messpunkt-Reproduzierbarkeit. Und im Vergleich zu kapazitiven Sensoren können LVDT ihre Unempfindlichkeit gegen rotative Verschiebung im Messkörper als Vorteil ausspielen: Werden die Sensoren radialem Versatz ausgesetzt, weil die zu bemessenden Körper falsch ausgerichtet oder frei beweglich sind, bleibt das Ausgangssignal davon unbeeinflusst.

Absolut robust

Extremen Umgebungstemperaturen gegenüber sind LVDT-Sensoren ebenfalls unempfindlich. Ein Außengehäuse aus Edelstahl, verchromtem oder vernickeltem Stahl schirmt sie zusätzlich gegen magnetische Störeinflüsse ab. Zudem sind die Geräte aufgrund des berührungslosen Messprinzips und der vergossenen elektronischen Bauteile hochgradig erschütterungsresistent. In Umgebungen mit hohem Staub- oder Schmutzaufkommen, in Atmosphären mit hoher Feuchtigkeit bis hin zur Funktion im Salzwasser oder korrosiven Gasen sind LVDT damit also häufig die bestmögliche Option. So sind z. B. bei der Schwingungsmessung von Brücken die LVDT erste Wahl – sie sind nicht nur im Umgebungsklima, sondern auch im Salzwasser beim Tidenhub im Einsatz.

Vielseitig und variantenreich

Da sich mit LVDT überdies nicht nur Wege messen lassen, sondern auch Größen wie z. B. Drehmoment, Kraft, Druck, Schwingung etc., die sich in Wegstrecken umformen lassen, eignen sie sich für vielfältige Steuer-, Regel- und Überwachungsaufgaben in der Fertigung. Dazu zählen beispielsweise die Lagemessung an Bauteilen oder Brücken, Ventilen, Robotern und sogar die Wachstumsmessung (z. B. Baumumfang über längere Zeiträume messen), sogar in der Neurochirurgie zur Gehirnkartierung. LVDT sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich, die eine bedarfsgerechte Anpassung an geforderte Genauigkeit, Messbereiche und Auflösung sowie den zur Verfügung stehenden Einbauplatz in der Zielanwendung ermöglichen.

Die häufigste Bauform sind LVDT mit Messtaster. Für diesen Typ muss keine Befestigung am zu messenden Objekt vorgenommen werden – der Kern ist stattdessen mit einer Tastspitze samt Rückstellfeder und integriertem Präzisionsgleitlager ausgestattet (Bild 4). Daneben sind Wegsen-

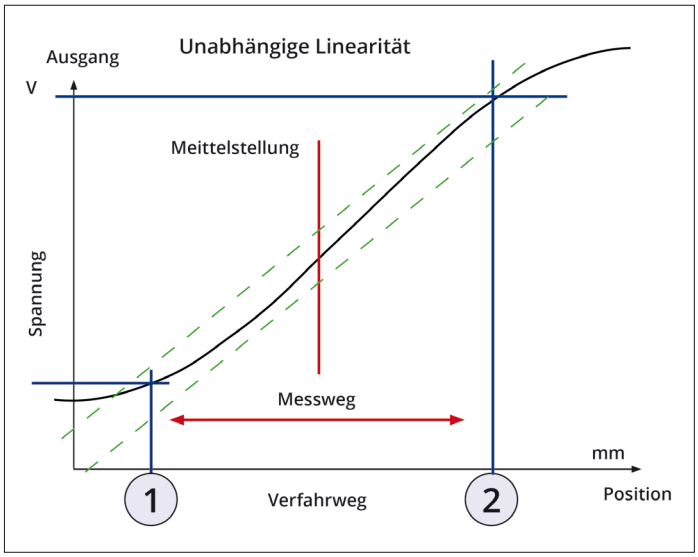

Bild 3: Messweg und Verfahrweg © Inelta

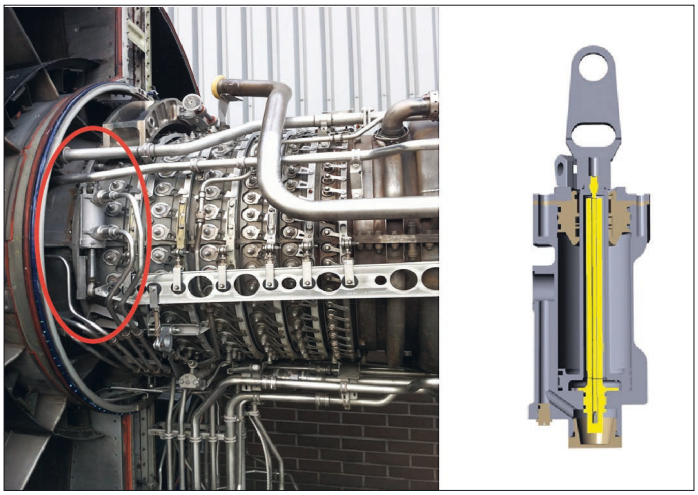

Bild 4: LVDT mit Querschnitt in einer Flugzeugturbine © Inelta

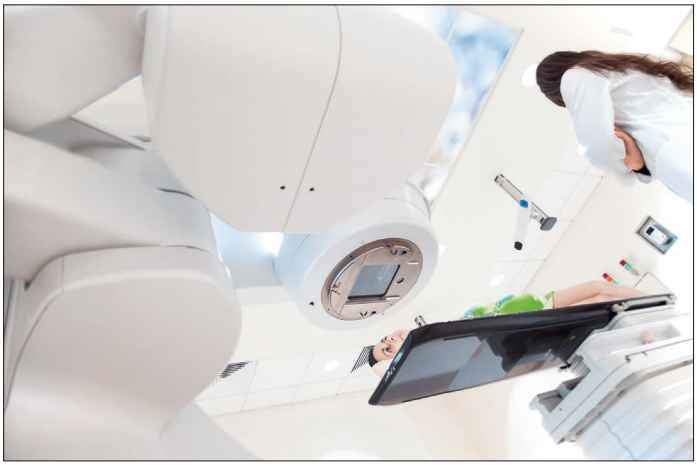

Bild 5: Röntgengerät in der Onkologie hospital-oncology-scanner-x-ray/122124533 © VILevi

sor-Varianten erhältlich, bei denen der Kern über ein Innengewinde mit Kernverlängerung verfügt. So kann er als Stößel direkt am sich bewegenden Objekt montiert werden. Diese Ausführung kann entweder mit einer Stößellagerung versehen sein oder berührungslos – also ohne Kontakt zwischen Spule und Kern – arbeiten. Die technischen Spezifikationen eines LVDT sind durch anwendungsspezifische Modifikationen in einem breiten Rahmen anpassbar. Auch das Spulensystem kann je nach Bedarf unterschiedlich implementiert werden, etwa um bessere Linearitäten oder gezielt nichtlineare Ausgangskennlinien zu erreichen, das Verhältnis zwischen Messbereich und Baulänge zu optimieren oder die Temperaturkompensation zu verbessern.

Fazit

Das Differential-Transformator-Prinzip sorgt für hervorragende Messqualität und bietet in einer Vielzahl industrieller Anwendungen Vorteile. Da LVDT-Sensoren langlebig und robust sind und sich gut schützen lassen, sind sie für die Verwendung in rauen Umgebungen geradezu prädestiniert. Induktive Wegmesser sind kaum störempfindlich und tolerieren auch extreme Temperaturen sowie rasche Temperaturwechsel. Für Pneumatik- oder Hydraulikzylinder sind druckdichte Ausführungen erhältlich. LVDT-Varianten mit hohem IP-Schutzgrad sind auch direkt in Flüssigkeiten einsetzbar – einschließlich aggressiven Chemikalien. Dank hoher Vibrationsfestigkeit sind die Sensoren zudem gut für mobile Anwendungen gerüstet. Unproblematisch sind angesichts der Verschleißfreiheit nicht zuletzt auch Anwendungen mit besonders dichten Prüfzyklen, zum Beispiel bei der Positionsmessung an Hydraulik-Proportionalventilen oder der Verstellung von Triebwerksschaufeln wie im Bildbeispiel dargestellt.

LVDT-Auszug aus aktuellen Beispielen der Medizintechnik:

- Motor- und Getriebeeinheit mit Winkelsensor zur Dimmung der Laserleistung in der Ophthalmologie
- Sensorbaugruppe für optomechanische Medizinprodukte
- Wegsensoren für multifunktionale Diagnosegeräte

LVDT-Auszug aus aktuellen Beispiele der Flugtechnik

- LVDT in Hubschraubern zur Überwachung der Rotorsteigung
- LVDT in hydraulischen Radialkolbenpumpen (druckfest)

So funktionieren LVDT

LVDT-Sensoren bestehen aus einem Spulensystem mit einer in der Mitte angebrachten Primärspule und zwei symmetrisch neben diesen installierten Sekundärspulen (Bild 6). Zur Erfassung und Übertragung der Bewegung eines Messobjekts wird ein mechanisch frei beweglicher, weichmagnetischer Kern in Form eines Stößels oder Tasters verwendet. Abhängig vom Messbereich wird an die Primärspule eine Wechselspannung mit einer Frequenz zwischen 1 und 10 kHz und einer Amplitude von 2,5 bis 5 V angelegt, die eine Wechselspannung in den Sekundärspulen induziert. Je nach axialer Verschiebung des Kerns verändert sich der Kopplungsfaktor des LVDTs. Bei Null-Lage des Kerns ist die Kopplung auf beide Sekundärwicklungen gleich groß. Eine Auslenkung dagegen verursacht eine proportionale Veränderung: Die induzierte Spannung ist dann in der Sekundärspule, zu der sich der Kern hin verschiebt, höher als in der Spule, von der er sich entfernt. Die Differenz der beiden Spannungen ist proportional zur Kernverschiebung und kann von der Elektronik anschließend ausgewertet und in ein normiertes Ausgangssignal zwischen 0…10 V bzw. 4…20 mA transformiert werden. Die zur Ansteuerung und Signalaufbereitung benötigte Elektronik lässt sich entweder integrieren oder vom Sensor absetzen. Im spezifizierten Messbereich weisen LVDT eine sehr gute Linearität und eine hervorragende Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit auf. ◄

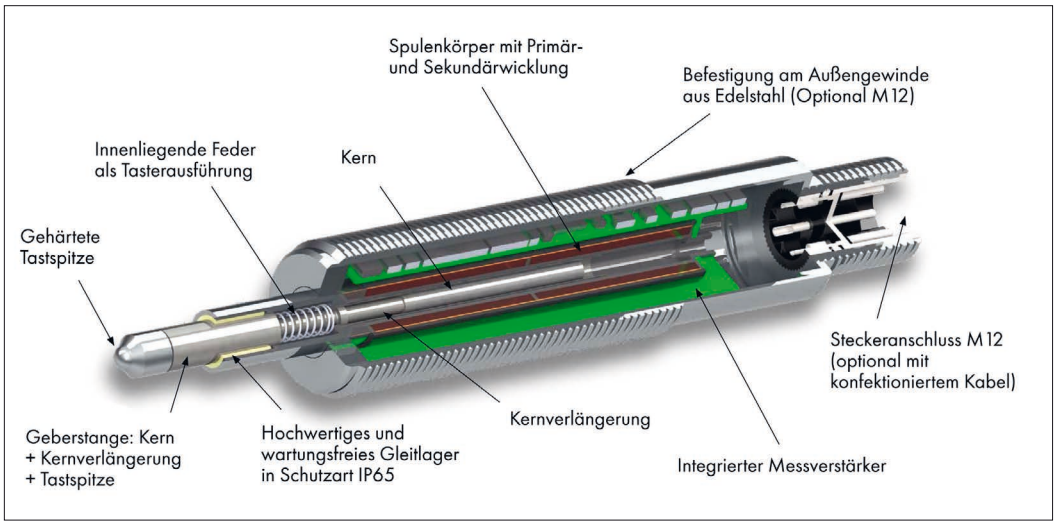

Bild 6: Schnittbild eines LVDT-Sensors in Taster-Ausführung © Inelta