

4. Entwurf einer linearen Prüfeinrichtung

4.1 Bestimmung der Strecken und Abschätzung der Mindestlebensdauer und der auftretenden Querkräfte.

Da die meisten Komponenten, die für den Einsatz in der linearen Prüfeinrichtung in Betracht kamen, für WZM oder Fließbandeinrichtungen konstruiert und entwickelt wurden und schon absehbar war, daß die Komponenten aufgrund der hohen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sehr stark belastet werden, haben wir eine Mindestlebensdauer ermittelt.

Als Grundlage nahmen wir eine angestrebte Lebensdauer von 10 Jahren an. Ferner nahmen wir an, daß auf keinen Fall 50 Tests pro Monat durchgeführt werden können. So ergab sich eine anzustrebende Mindestlebensdauer von $50 \text{ Tests/Monat} * 12 \text{ Monate/Jahr} * 10 \text{ Jahre} = \underline{6.000 \text{ Tests}}$. Für die Lagerung mußte noch der erforderliche Weg abgeschätzt werden.

Unter der Annahme, daß 100mm für die Beschleunigung, 150mm für die Prüfstrecke und weitere 100 mm für die Verzögerung benötigt werden, ergab sich ein Weg von 350 mm. Das sind pro Versuch 700mm, und auf 10 Jahre gerechnet $6.000 * 0,7m = \underline{4.200m}$. Diese Werte sind für WZM und Fließbandeinrichtungen sehr niedrig und zum Teil schon an einem Arbeitstag erreicht.

Für die Querkräfte beim Stoß habe ich angenommen, daß sie maximal 100% der Kraft in Stoßrichtung erreicht. Für einen noch als normal anzusehenden Versuch haben wir eine Beschleunigung von 100g angenommen. Damit beträgt die maximale Querkraft, die durch die Lagerung aufgenommen werden muß $100 * 10\text{m/s}^2 * 6,8\text{kg} = \underline{6.800N}$. Es ist jedoch zu beachten, daß maximal 200g Stöße auftreten können. Hier ist zu erwarten, daß der Test nicht bestanden wird.

Bei Stößen, die in der Größenordnung von mehr als 150g liegen, darf es in der Führung zu einer erhöhten Reibung kommen, aber die Führung darf dadurch nicht beschädigt werden. Eine Kopfstütze mit einer so hohen Verzögerung hätte die Prüfung vermutlich nicht bestanden. Als Häufigkeit werden zwei Stöße pro Jahr angenommen. Das bedeutet, daß die Lagerung so ausgelegt werden muß, daß sie ca. 6.000 mal mit 6.800N und ca. 20 mal mit 13.600N, jedoch auch mit erhöhter Reibung ohne wesentliche Verschleiß übersteht. Um die Lagerkräfte zu ermitteln, wurden folgende Wege angenommen:

200 mm vor der 1. Lagerung tritt die maximale Kraft auf. Diese 200 mm ergeben sich aus der Annahme, daß 25 mm für die Verzögerung bei 100g benötigt werden und daß 100 mm Weg bei einer Beschleunigung von 20g benötigt werden, 175 mm wurden als Sicherheit angenommen, da nicht die gesamte Verzögerung bei 100g liegt und der Abstand zum realen

Lagermittelpunkt nicht bekannt ist. Als Lagerabstand wurden 100mm gewählt, um die gesamte Einrichtung nicht zu lang werden zu lassen. Daraus ergibt sich aus der folgenden Formel die Kraft für das 1. Lager:

$$F_{1, \text{Lager}} \stackrel{?}{=} \frac{200\text{mm} * 6.800\text{N}}{100\text{mm}} ? 6.800\text{N} ? 20\text{kN}.$$

Die Erläuterung zu den angenommenen Wegen, siehe Anhang 14.8 – Der lineare Prüfstand -.

4.2 Bewertung verschiedener Beschleunigungseinrichtungen

Zur Beschleunigung können folgende Komponenten genutzt werden. Hydraulikzylinder, Pneumatikzylinder, Linearmodule bestehend aus E-Motor, Wälzlagerführung und Riemen- bzw. Kugelspindeltrieb, Linearmotoren, Federn und ähnliche Techniken wie bei Kanonen und Gewehren.

Hydraulikzylinder:

- + es wird eine hohe Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeit erwartet
- sehr teuer, das Angebot für eine Beschleunigungseinrichtung mit Freilauf von einem namhaften amerikanischen Anbieter lag bei ca. 100TDM inkl. Steuerung, ein geeignetes Propventil kostet ca. 5TDM und eine Steuereinheit 25TDM

Pneumatikzylinder:

- + günstig, der Zylinder kostet ca. 500 DM, ein Propventil ca. 800 DM, die Ansteuerung kann vom Erfassungs-PC erfolgen.
- + Druckluft ist bis 8bar vorhanden.
- + einfacher Anschluß
- die Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeit wird recht ungünstig sein
- Standardzylinder sind ungeeignet, da sie zu kleine Luftein- und –auslässe haben.

Linearmodule:

- + rel. einfache Ansteuerung
- als Lagerung werden Wälzlager verwendet, s. "Auswahl der Lagerung"
- Riementrieb ist an der Grenze seiner Belastbarkeit (keine Sicherheit mehr)
- alternative Kugelrollspindel, s. Wälzlager.
- große Baugröße

Linearmotoren:

- + rel. einfache Ansteuerung
- Beschleunigungen können mit der geforderten Masse nicht erreicht werden

Pyrotechnische Geräte wie z.B. Kanonen und Gewehre:

- + einfach Technik
- + vermutlich günstig
- eventuelle Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeit

- Gefahren der Explosion.
- Gefahren beim Handling der Ladung

Federn:

- + günstig
- schlechte Einstellbarkeit
- zusätzliche Spannvorrichtung notwendig
- bei vergleichbaren Einrichtungen ergab sich einen schlechten Reproduzierbarkeit.

Hier kann man erkennen, daß Hydraulikzylinder, Linearmodule und Linearmotoren aus technischen und finanziellen Gründen ausscheiden. Ich habe mich, nach Absprache mit meinem Betreuer und meinen Kollegen, dazu entschlossen, die Lösung mit einem Pneumatikzylinder an einem Prototypen zu testen.

4.3 Auswahl der Lagerung

Für lineare Bewegungen können folgende Lagerungen verwendet werden: Hydraulische Lager, Luftlager, Wälzlager, elektromagnetische Lager und Gleitlager. Diese Lager habe ich alle bei Herstellern und Händlern angefragt und habe sie mit einander verglichen.

Wälzlager:

- + sehr geringer Reibwert
- + exakte Führung
- + geringer Preis
- die Wälzkörper sind für die Beschleunigungen zu träge. Das bedeutet, daß undefinierte Gleitzustände mit hohem Verschleiß auftreten.

Gleitlager:

- + günstiger Preis
- + die auftretenden Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sind beherrscht
- hoher Reibwert

Hydraulische Lager:

Hydrodynamische Lager können nicht genutzt werden, da zu häufig aus dem Stillstand angefahren wird.

Hydrostatische Lager

- + rel. niedriger Reibwert
- teuer und aufwendig
- die Beschleunigungen sind nach Herstellerangaben nicht beherrscht. Dies bezieht sich auf Standardlager für Werkzeugmaschinen. Bei größeren Anlagen, wie Katapultanlagen und hochdynamischen Hydraulikzylindern werden jedoch hydrostatische Lagerungen eingesetzt.

Elektromagnetische Lager

- + Reibbeiwert ist fast =0
- teuer
- die Regelung könnte nach Herstellerangaben Probleme bereiten und die

Kräfte seien zu hoch.

Luftlager

- + Reibbeiwert ist fast =0
- Lagerung würde ca. 20TDM kosten
- der Durchmesser der Welle muß ? 110 mm sein. (Berechnung im n. Abs.)

Für die Berechnung des Lagerdurchmessers wurden folgende Werte angenommen: Der Lagerbeiwert = 0,35, dies ist das Verhältnis zwischen der Kraft, die man errechnet, wenn man den Luftdruck mit der projizierten Lagerfläche multipliziert und der Kraft mit der man das Lager belasten kann. Die Kraft auf das 1.Lager $F_{1.lager} = 5\text{kN}$, die aus den Versuchen, die in dem Abschnitt „ Bestimmung der Querkräfte beim Stoß “ näher erläutert werden und den gewählten Abständen ermittelt wurden. Gewählt wurden ein Druck von $p=12\text{bar}$. Dies ist der maximale Druck mit dem gewährleistet werden kann, daß das Lager im stabilen Bereich arbeitet. Weiterhin wurde eine Lagerlänge von $l=100\text{mm}$ für das Lager angenommen.

$$p_{eff} \stackrel{?}{=} p * 0,35 \stackrel{?}{=} 1.200.000\text{N/m}^2 * 0,35 \stackrel{?}{=} 420.000\text{N/m}^2$$

$$A_{erf} \stackrel{?}{=} \frac{F_{1.lager}}{p_{eff}} \stackrel{?}{=} \frac{5.000\text{N}}{42.000\text{N/m}^2} \stackrel{?}{=} 0,0119\text{m}^2$$

$$D_{erf} \stackrel{?}{=} \frac{A_{erf}}{l} \stackrel{?}{=} \frac{0,0119\text{m}^2}{0,1\text{m}} \stackrel{?}{=} 119\text{mm}$$

Da die Wälzlager, hydrostatische Lager und elektromagnetische Lager vom Hersteller bzw. vom Handel als eher ungeeignet eingestuft wurden, sind diese im weiteren nicht mehr untersucht worden. Es gab zu diesem Zeitpunkt noch 2 Alternativen, einmal die Gleitlagerung und zum anderen eine Luftlagerung.

4. 4 Optimierung und Auslegung der pneumatischen Beschleunigungseinrichtung

4.4.1 Auslegung

Zylinder

$$F_{Zylinder} = m * a = 10\text{kg} * 20 * 10\text{m/s}^2 = 2.000\text{N}$$

Annahme 6,8kg Masse + Kolbenstange = 10kg, damit später damit auch eine Freiflugeinrichtung beschleunigt werden kann. Bei einem Prüfstand mit Freiflugkörper wird ein Körper mit der Masse von 6,8kg, der dem menschlichen Gesicht nachgebildet ist, linear beschleunigt und fliegt dann im freien Flug auf den zu prüfenden Gegenstand. Für diese oben berechnete Kraft wird im Hersteller-Katalog ein Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm empfohlen.

Durchfluß für das Ventil

Kolbendurchmesser D = 1dm=100mm

Geschwindigkeit des Kolbens $v_{max} = 7\text{m/s}$

$$\bar{V} = \pi D^2 \cdot v = \frac{3,14 \cdot (1dm)^2}{2} \cdot 7m/s \cdot 3600s/h = 40.000m^2/h$$

Hier werden von den Herstellern Ventile von 3/4“ und 1“ empfohlen.

Grenzen der pneumatischen Standardlösungen:

Bei der Simulation des Beschleunigungsvorganges im Rechner des Herstellers ergaben sich folgende Probleme:

- die Luftein- und –auslässe sind auch in der Ausführung mit 2 mal 1/2“ zu klein
- die Endlagendämpfung reicht nicht aus.

Bei der Auswahl von Ventilen zur Steuerung des Pneumatikzylinders, die den erforderlichen Durchfluß gewährleisten, wurde das nächste Problem sichtbar. Die Öffnungszeit und die Schließzeit eines Standartventils liegt bei 50 bis 60ms, die Zeiten eines Spezialventils mit 2 Spulen liegt bei 16-18 ms. Der Vorgang der Beschleunigung mit 20g von 0 auf 7m/s dauert ca. 35 ms. Dies würde bedeuten, daß das Ventil sofort nach dem vollständigen Öffnen wieder geschlossen werden muß und daß das Ventil während des ganzen Vorgangs in einer undefinierten Lage ist.

4.4.2 Lösungen für diese Probleme:

Ein 10l-Druckspeicher, mit einem 1“ Abgang wird über einen Druckregler „aufgeladen“ dieser ist mit einem 1“ Schlauch an ein schnelles 3/4“ Ventil angeschlossen, von dort geht ein 1“ Schlauch zu dem neu konstruierten Zylinderboden mit einem 1“ Einlaß. Die Kolbenstange wird festgehalten, so kann das Ventil geöffnet werden und der Kolben mit Druck beaufschlagt werden. Wird die Kolbenstange jetzt gelöst, so schießt der Kolben nach vorne. Nach 100 mm überfährt er eine Lochreihe in der Zylinderwand, so wird der Überdruck, der den Kolben beschleunigte, abgebaut und der Kolben sowie die Kolbenstange und der Prüfkörper können sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter bewegen. Zur Verzögerung wird am 2. Zylinderboden ein Dämpfer montiert, der den Kolben verzögert, falls kein Prüfkörper in der Prüfstrecke war.

4.5 Auswahl der optimalen Geschwindigkeitsmeßeinrichtung

Die zu bestimmende Geschwindigkeit liegt bei ca. 7 m/s. Die Meßwerterfassungssoftware, die in unserem Unternehmen standardmäßig eingesetzt wird, kann mit 1.000 Hz (alle 1ms ein Wert) regeln. Durch ein vom Software-Hersteller für uns programmiertes Treibermodul können bis zu 4 Kanäle unabhängig von der Regelung mit 15 kHz aufgezeichnet werden. Es war ursprünglich geplant, daß der Beschleunigungsvorgang bei dem H-Punkt-Pendel über diese Meßfassungssoftware geregelt wird. Die Kanäle der Beschleunigungsaufnehmer werden mit 15kHz aufgezeichnet.

$t = \frac{s}{v} = \frac{10\text{mm}}{7\text{m/s}} = 1,43\text{ms}$. Diese Formel soll nur verdeutlichen, wie schnell 10 mm zurückgelegt worden sind.

Zur Geschwindigkeitsmessung gibt es folgende Verfahren, die alle zur indirekten Ermittlung der Geschwindigkeit geeignet sind: Dies bedeutet, man mißt nicht die Geschwindigkeit, sondern die Zeit und den in dieser Zeit zurückgelegten Weg, hieraus ermittelt man die Geschwindigkeit.

Die Messung des Weges mit mechanisch verbunden Maßstäben, so wie Ultraschallsensoren und Seilwegaufnehmern: sind aufgrund der mechanischen Anbindung an den Prüfkörper nicht untersucht worden, da hier sehr hohe Beschleunigungen auftreten und der Prüfkörper sich voraussichtlich frei um seine Schußachse drehen könnte.

Eine sehr genaue und sehr verbreitete Methode der Geschwindigkeitsbestimmung ist die Verwendung von Lichtschranken. Diese benötigt allerdings eine rel. lange Strecke mit konstanter Geschwindigkeit, oder eine sehr hohe Abtastrate um ein genaues Ergebnis zu erhalten. Des Weiteren kann man keinen Geschwindigkeitsverlauf erkennen und die Geschwindigkeit nicht am Aufschlagpunkt ermitteln.

Alle anderen Möglichkeiten z.B. Ultraschall (offen), Infrarot oder Radar die Geschwindigkeit zu bestimmen, wurden von den Herstellern als nicht geeignet bezeichnet.

Als einziges berührungsloses Wegemeßsystem,

- das man auf einen Punkt fokussieren kann
 - das die Messungen in hinreichender Geschwindigkeit (10kHz) und mit ausreichender Genauigkeit (+/- 0,1mm) durchführt,
 - nicht auf statische Luftverhältnisse angewiesen ist und
 - sehr stoßunempfindlich ist,
- ergab sich ein laser-optisches Wegemeßsystem.

Das System mißt nach dem Triangulationsprinzip und funktioniert wie folgt beschrieben:

- ein gebündelter Laserstrahl wird ausgesendet,
- dieser wird an der zu messenden Oberfläche reflektiert und
- diese Reflexion wird im Sensor über eine Optik auf eine lichtempfindliche Halbleiterplatte gebündelt.

Die Elektronik wertet die Position auf der Halbleiterplatte aus. Hieraus kann der Winkel zwischen dem ausgesendeten Strahl und dem reflektierten Strahl bestimmt werden (s. Bild 6, siehe folgende Seite). Hieraus ergibt sich der Abstand, der reflektierenden Oberfläche zum Laser. Die Auswerte-Elektronik des Lasers gibt eine Spannung von -5 bis +5 V linear proportional zum Weg aus. Dieses Signal kann dann im Erfassungs-PC ausgewertet werden.

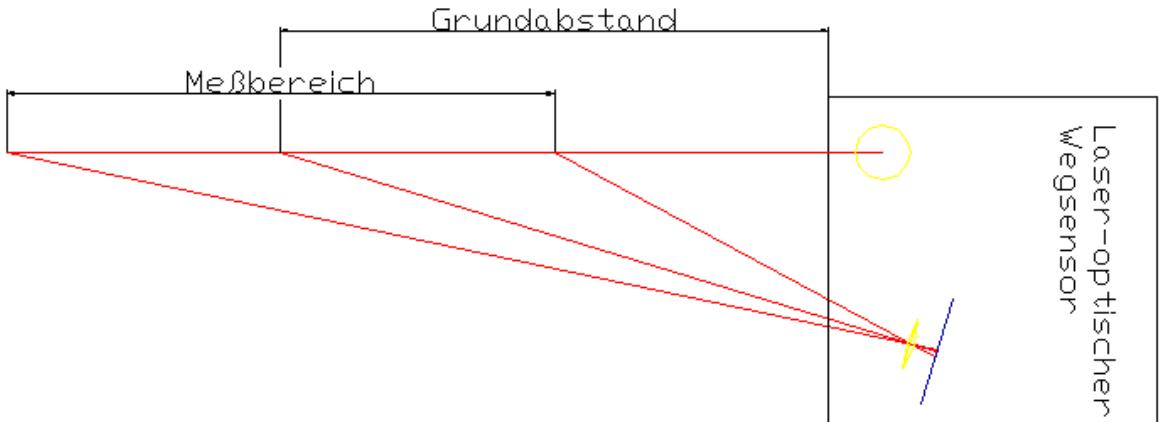


Bild 6

Von diesem System gibt es eine Ausführung mit analoger Auswertung und einer digitalen Auswertung. Sie arbeiten beide nach dem gleichen Prinzip und unterscheiden sich nur in der Genauigkeit und im Preis. Um zu ermitteln welches der beiden Geräte für unseren Verwendungszweck das geeignetste ist, hat uns der Hersteller folgende Geräte zur Verfügung gestellt:

- 1 analoges Gerät mit einem Meßbereich von +/- 50 mm, also 100 mm. Der Meßbereich ist so klein gewählt worden, um eine höhere Genauigkeit zu erhalten. Dieses Gerät kostet ca. 3,5 TDM.
- 1 digitales Gerät mit einem Meßbereich von +/- 100 mm. Der größere Meßbereich konnte gewählt werden, da hier die digitale Auswertung genauer ist als die analoge Auswert. Dieses Gerät kostet ca. 9 TDM mehr.

Der Vorteil des digitalen Systems liegt im größeren Meßbereich, mit dem ich nicht nur den Weg während der Beschleunigung, sondern auch während der Verzögerung aufnehmen kann. Dies würde eine genaue Ermittlung der Energieaufnahme ermöglichen, da wie im folgenden beschrieben die Weg-Zeit-Funktion gemessen und nicht berechnet wird.

Hier gibt es nämlich aus Erfahrung einen Unterschied zwischen Theorie und Praxis.

Energie ist die Fläche im Kraft-Weg-Diagramm. Theoretisch könnte man die Masse des Prüfkörpers mit der Beschleunigung multiplizieren und erhält so die Kraft über die Zeit. Integriert man das Beschleunigungs-Zeit-Signal einmal, so erhält man das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm, als Integrationskonstante muß man die Aufprallgeschwindigkeit hinzufügen. Integriert man dieses Signal noch einmal, so erhält man das Weg-Zeit-Diagramm. Hier

erhält man Wege, die teilweise um mehr als 100% zu lang sind. Jetzt muß man nur noch das Kraft-Zeit- mit dem Weg-Zeit-Diagramm verknüpfen und das Kraft-Weg-Diagramm integrieren. Der größte Fehler, bei dieser Form der Energieaufnahme-Berechnung liegt in der Doppelt-Integration des gefilterten Beschleunigungssignals. Diese Berechnungen erfolgen numerisch mit Hilfe des Erfassungsprogrammes. Diese Fehler kommen aufgrund der mehrfachen Integration von Meßwerten die auch fehlerbehaftet sind zustande.