EINE SPEZIFISCHE SCHACHTFÖRDERUNGSAUFGABE

R. VANKÓ

Zentralinstitut für die Entwicklung des Bergbaues,
H-1027 Budapest

Eingegangen am 29. März 1984

Summary

In this short study the author proposes a novel winding system for use in gassy blind shafts. The outlined system is simple, however provides a completely safe winding.

Die untertägigen Sohlen von Bergwerken werden oft durch die an die Tagesoberfläche nicht angeschlossenen sog. *Blindschachten* verbunden. Wird in dem Blindschacht auch Förderung betrieben, so wird die Fördermaschine meistens in einem untertägigen Maschinenraum untergebracht. Dieses untertägige Anlegen ist aber aus maschinentechnischem, besonders aus elektrotechnischem Gesichtspunkt mit spezifischen Erfordernissen verbunden. In einem schlagwettergefährlichen Bergwerk wird der elektrische Antrieb möglicher Weise überhaupt nicht zugelassen, die verwendbare Preßluftförderung verfügt über einen sehr schlechten Wirkungsgrad und ist auch teuer. In einem Blindschacht ist meistens nur eine Hilfsförderung erforderlich, weshalb anstelle der zweikörbigen Förderung die Anwendung der einkörbigen Förderung mit Gegengewicht auch genügt. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, daß keine relative Lageänderung der beiden Körbe, kein Sohlenwechsel erforderlich ist. Dadurch kann eine Treibscheibenfördermaschine eingesetzt werden, die aber die Verwendung eines Gegengewichtsseiles ermöglicht.

Die einkörbliche Förderung kleiner Leistung kann durch ein Gegengewicht mit veränderbarer Masse, durch eine Maschine ohne Antriebsmotor, durch Bremsung und durch *Senken* des jeweiligen Übergewichtes realisiert werden. Dadurch entfällt sowohl der elektrische als auch der pneumatische Antrieb.

Eine Änderung der Masse des Gegengewichtes kann am einfachsten mit Wasser durchgeführt werden, ein Behälter bildet das erforderliche Grundgegengewicht von kleinster Masse, das Wasser kann in diesen ein-, bzw. aus diesem ausströmen. Das abgeführte Wasser fließt in den Schachtsumpf hinab. Mit Wasser muß in allen Bergwerken gerechnet werden, die Menge die die

Förderung benötigt ist daneben unbedeutend. Das sowieso in einer Wasserschacht untergebrachte Pumpensystem hebt diese empor. Letzten Endes wird der Energiebedarf der Förderung durch das sowieso erforderliche Pumpensystem gedeckt.

Bei einer Belastung gegebener Masse können die folgenden 4 Förderungsfälle auftreten:

1. Bewegung des leeren Korbes nach unten
2. Bewegung des leeren Korbes nach oben
3. Bewegung des vollbeladenen Korbes nach unten
4. Bewegung des vollbeladenen Korbes nach oben.

Eine zweckmäßige Forderung ist die, wonach in jedem Fall N kg des Übergewichtes gleich sein soll. Beträgt die Masse des Korbes K kg, die des Fördergutes R kg, so ergeben sich die erforderlichen Massen der Gegengewichte in den obengenannten 4 Förderungsfällen der Reihe nach zu:

$$E_1 = K - N$$

$$E_2 = K + N$$

$$E_3 = K + R - N$$

$$E_4 = K + R + N$$

Offensichtlich ist es am wichtigsten — entsprechend der klassischen Förderung mit Gegengewicht — wenn $E_2 = E_3$ gilt, wonach sich $N = \frac{R}{2}$ ergibt, und

$$E_1 = K - \frac{R}{2}$$

$$E_2 = K + \frac{R}{2} = E_3$$

$$E_4 = K + \frac{3}{2} \cdot R$$

erhalten wird.

Die Masse des Grundgegengewichtes, des Behälters beträgt

$$E = E_1 = K - \frac{R}{2}$$

Beim Übergang von der Beförderungsart 1 auf die Beförderungsart 2 beträgt die Masse des erforderlichen Zusatzwassers

$$Q_{12} = E_2 - E_1 = R$$

Beim Übergang von der Förderungsart 2 auf die Förderungsart 3 ist die Masse des Gegengewichtes nicht zu ändern, es gilt also $E_3 = E_2$.

Beim Übergang von der Förderungsart 3 auf Förderungsart 4 ergibt sich die Masse des noch benötigten Zusatzwassers zu:

$$Q_{34} = E_4 - E_3 = R = Q_{12} = Q$$

Wenn der leere Korb nach seinem Ausgang mit voller Beladung nach oben fördert, also beim Übergang von der Förderungsart 1 auf Förderungsart 4 beträgt die Masse des zugleich erforderlichen Zusatzwassers

$$Q_{14} = E_4 - E_1 = 2 \cdot R = 2 \cdot Q$$

Bei der Änderung der Förderungsart umgekehrter Reihenfolge sollen die angegebenen Wassermengen Q bzw. $2Q$ aus dem Gegengewicht-Behälter ausgelassen werden.

Praktisch ist es am richtigsten, wenn das Gegengewicht der Masse E kg in Form eines zweiteiligen Behälters ausgebildet wird, wobei diese separat aufgefüllt bzw. entleert werden können und je in einem Behälterteil eine Wassermenge mit einer Masse von Q kg untergebracht werden kann.

Da in den vier Förderungsfällen die Massen der Senkgegengewichte den gleichen Wert von $N = \frac{R}{2}$ kg haben, so sind die Bewegungsgleichungen miteinander auch identisch, eine unbedeutende Abweichung ergibt sich aus der infolge der Änderung der Belastung und der Gegengewicht-Wassermenge auftretenden Veränderung des reduzierten Gesamtmassenwertes.

Der gesamte Korbweg soll H m, die Masse des Förderseiles q_0 kg/m, die Seilmasse des unteren Gegengewichtes q_A kg/m, die auf den Treibscheibenumfang reduzierte Masse des rotierenden und sich ortbewegenden Gesamtsystems m kg und die Schachtreibung des Korbes und des Gegengewichtes Z N betragen (Abb. 1).

Aus Sicherheitsgründen liegt die Grenze der Maximalgeschwindigkeit bei v_0 m/s. Dieser Wert sollte nach der Anfahrt während der kürzesten Zeit erreicht werden und danach sollte möglicherweise damit auf einer so langen Strecke wie möglich gefahren werden. Die andauernde mechanische Bremsung kann nicht angewendet werden, da sie zu einer bedeutenden Wärmeentwicklung und Erwärmung führt, die eben in den schlagwettergefährdeten Bergwerken in keiner Weise zugelassen werden darf. Die genaue Regelung der mechanischen Bremsung würde auch eine fast unlösbare komplizierte Aufgabe bedeuten, weshalb die mechanische Bremseinrichtung nur während der kurzen Zeitspanne des Anhaltens eine konstante Bremskraft F N ausübt.

Der während der Anfahrt kleine, aber später andauernd große Wert der Bremskraft kann am besten durch den Antrieb eines Ventilators angenähert werden. Seine Bremswirkung ändert sich mit der Drehzahl, also mit der Geschwindigkeit quadratisch, d. h.: $F_v = C_v \cdot v^2$. Der Ventilator kann der

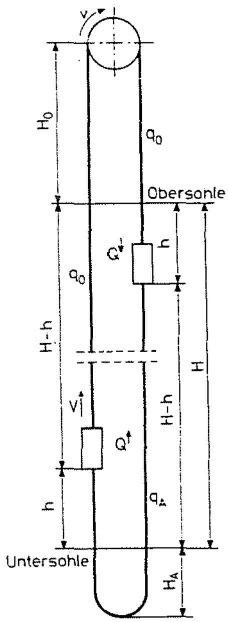

Abb. 1

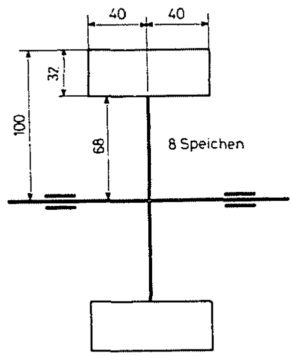

Abb. 2

möglichst einfachste sein, sein Wirkungsgrad spielt keine Rolle, da das Ziel seiner Anwendung nur die Bremsung ist.

Die Abb. 2 zeigt die Daten eines Ventilators in prozentualer Abhängigkeit von dem Speichenradius, die Parameter wurden aus dem Buch B. Eck: Ventilatoren (Ausgabe Springer) übernommen. Zur Realisierung der günstigen Abmessungen ist eine maximale Drehzahl von cca. 1500—2000 U/min wünschenswert. Somit kann die Treibscheibenachse die Ventilatorachse über ein Übersetzungsgetrieb antreiben.

Am Ende des Laufes, also noch vor dem Beginn der mechanischen Bremsung ist es wünschenswert, daß die Geschwindigkeit abnehme. Das letztere und auch das zügigere Anfahren wird durch die Verwendung eines schweren Unterseiles begünstigt: $q_A > q_0$, $q = q_A - q_0 > 0$. Die Differenz der Massen des Unter- und des Oberseiles—q kg/m—soll zweckmäßigerweise einen positiven Wert haben.

Danach kann die beim der Anfahrt gültige Bewegungsgleichung mit den angegebenen und mit den Daten der Abb. 1 aufgeschrieben werden. Die Differenz der Massen des Gegengewichtes und des sich nach oben und nach unten bewegenden Korbes ist in allen vier Förderungsfällen die gleiche $N = Q^{\downarrow} - Q^{\uparrow}$, somit ergibt sich die Bewegungsgleichung zu:

$$N \cdot g + q_0 \cdot h \cdot g + q_A \cdot (H-h) \cdot g - q_0 \cdot (H-h) \cdot g -$$

$$q_A \cdot h \cdot g - Z - C_v \cdot v^2 = m \cdot a$$

$$N \cdot g + q_0 \cdot g \cdot 2h - q_0 \cdot g \cdot H + q_A \cdot g \cdot H - q_A \cdot g \cdot 2h -$$

$$- Z - C_v \cdot v^2 = m \cdot a$$

$$N \cdot g + q \cdot g \cdot H - 2q \cdot g \cdot h - Z - C_v \cdot v^2 = m \cdot a$$

In der Bewegungsgleichung bezeichnet v m/s die Momentangeschwindigkeit des Korbes und des Gegengewichtes nach Durchlaufen einer Korbstrecke h m, a m/s^2 bezeichnet die momentane Beschleunigung.

Nach Umordnen und nach Einführung der zur Erleichterung der Durchführung von numerischen Berechnungen verwendeten Bezeichnungen erhält man eine Differentialgleichung in der Form von:

$$m \cdot a + C_v \cdot v^2 + 2q \cdot g \cdot h - (N \cdot g - Z + q \cdot g \cdot H) = 0$$

$$a + \frac{C_v}{m} \cdot v^2 + \frac{2q \cdot g}{m} \cdot h - \frac{N \cdot g - Z + q \cdot g \cdot H}{m} = 0$$

$$a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 h}{\mathrm{d}t^2}, \qquad v = \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}, \frac{C_v}{m} = \frac{1}{C},$$

$$\frac{2q \cdot g}{m} = \frac{1}{B}, \qquad \frac{N \cdot g - Z + q \cdot g \cdot H}{m} = A$$

$$a + \frac{v^2}{C} + \frac{h}{B} - A = 0$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 h}{\mathrm{d}t^2} + \frac{\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\right)^2}{C} + \frac{h}{B} - A = 0 \qquad \text{(D)}$$

Die aufgeschriebene Differentialgleichung hat keine exakte Lösung, durch Elimination der Zeit kann aber die Aufgabe gelöst werden.

Unter Anwendung von $\mathrm{d}t=\frac{\mathrm{d}h}{v}$, $a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}\cdot v$ lautet die Differentialgleichung:

$$v\cdot\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}+\frac{v^2}{C}+\frac{h}{B}-A=0$$

Wird jetzt

$$\frac{v^2}{C}-A=\frac{y^2}{C},\qquad v^2-C\cdot A=y^2$$

eingeführt, so folgt mit

$$\frac{2v}{C}\cdot\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}=\frac{2y}{C}\cdot\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}h},\qquad v\cdot\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}=y\cdot\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}h}$$

die inhomogen Differentialgleichung der Form von

$$y\cdot\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}h}+\frac{y^2}{C}=-\frac{h}{B}$$

und die homogene Differentialgleichung der Form von

$$Y\cdot\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}h}+\frac{Y^2}{C}=0$$

die auch in Form von

$$Y\cdot\left(\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}h}+\frac{Y}{C}\right)=0$$

angegeben werden kann.

Die eine, im vorliegenden Fall die triviale Lösung wird durch $Y=0$, $v_0^2=AC$ geliefert, wobei v_0 die Grenzgeschwindigkeit bezeichnet.

Die andere verwendbare Lösung erhält man aus der Gleichung

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}h}+\frac{Y}{C}=0$$

Die charakteristische Gleichung ergibt sich zu

$$\lambda+\frac{1}{C}=0$$

$$\lambda=-\frac{1}{C}$$

Woraus

$$Y = x \cdot e^{-\frac{h}{C}}$$

$$\frac{dY}{dh} = \frac{dx}{dh} \cdot e^{-\frac{h}{C}} - \frac{x \cdot e^{-\frac{h}{C}}}{C}$$

$$Y^2 = x^2 \cdot e^{-\frac{2h}{C}},$$

folgt.

Nach Einsetzen in die inhomogene Gleichung erhält man:

$$x \cdot e^{-\frac{h}{C}} \cdot \left(\frac{dx}{dh} \cdot e^{-\frac{h}{C}} - \frac{x \cdot e^{-\frac{h}{C}}}{C} \right) + \frac{x^2 \cdot e^{-\frac{2h}{C}}}{C} = -\frac{h}{B}$$

$$\frac{dx}{dh} \cdot x \cdot e^{-\frac{2h}{C}} = -\frac{h}{B}$$

woraus nach Trennung der Variablen

$$x \cdot dx = -\frac{e^{\frac{2h}{C}} \cdot h}{B} \cdot dh$$

folgt.

Wird die rechte Seite des Ausdruckes partiell integriert, so folgt mit

$$\int u \cdot v' = u \cdot v - \int u' \cdot v$$

und

$$u = h, \quad u' = 1, \quad v' = e^{\frac{2h}{C}}, \quad v = \frac{C}{2} \cdot e^{\frac{2h}{C}}$$

der Ausdruck

$$\int x \cdot dx = -\frac{1}{B} \int e^{\frac{2h}{C}} \cdot h \cdot dh$$

Nach Durchführung der Integration erhält man:

$$\frac{x^2}{2} = -\frac{C}{2B} \cdot h \cdot e^{\frac{2h}{C}} + \frac{C}{2B} \int e^{\frac{2h}{C}} \cdot dh$$

$$x^2 = -\frac{C}{B} \cdot h \cdot e^{\frac{2h}{C}} + \frac{C^2}{2B} \cdot e^{\frac{2h}{C}} + C_1$$

Nach Zurücksetzen ergibt sich:

$$y^2 = x^2 \cdot e^{-\frac{2h}{C}} = -\frac{C}{B} \cdot h + \frac{C^2}{2B} + C_1 \cdot e^{-\frac{2h}{C}}$$

und

$$v^2=y^2+A\cdot C=-\frac{C}{B}\cdot h+\frac{C^2}{2B}+C_1\cdot e^{-\frac{2h}{C}}+A\cdot C$$

woraus mit den Anfangsbedingungen $h=0$, $v=0$

$$C_1=-\left(A\cdot C+\frac{C^2}{2B}\right)$$

$$v^2=\left(A\cdot C+\frac{C^2}{2B}\right)\cdot\left(1-e^{-\frac{2h}{C}}\right)-\frac{C}{B}\cdot h$$

folgt. Daraus ergibt sich die Geschwindigkeit-Weg-Funktion in Form von

$$v=\sqrt{\left(A\cdot C+\frac{C^2}{2B}\right)\cdot\left(1-e^{-\frac{2h}{C}}\right)-\frac{C}{B}\cdot h} \qquad \text{(V)}$$

Wird der Wert von v^2 in die ursprüngliche Differentialgleichung (D) eingesetzt, so erhält man die Beschleunigung-Weg-Funktion:

$$a=A-\frac{h}{B}-\frac{v^2}{C}=\left(A+\frac{C}{2B}\right)\cdot e^{-\frac{2h}{C}}-\frac{C}{2B}$$

Beim Anhalten soll zweckmäßigerweise der Vorgang in umgekehrter Richtung untersucht werden, da in diesem Fall die Anfangsbedingungen eindeutig und einfach sind: $t=0$, $v=0$, $h=0$. In diesem Fall erhält man Vorzeichenwechsel, die Bremskräfte treten in der Berechnung als Antriebskräfte auf. Somit ergibt sich die Bewegungsgleichung zu:

$$-N\cdot g+F+Z+C_v\cdot v^2+q\cdot g\cdot H-2q\cdot g\cdot h=m\cdot a$$

Nach einem Umordnen wie vorher ergibt sich die Differentialgleichung zu

$$a-\frac{v^2}{C}+\frac{h}{B}-A=0,$$

wobei

$$A=\frac{F-N\cdot g+Z+q\cdot g\cdot H}{m} \qquad \text{gilt.}$$

Die übrigen Bezeichnungen stimmen mit den vorherigen überein. Der Berechnungsgang ist auch ähnlich. Die Ergebnisse (Lösungen) ergeben sich zu

$$v^2=\left(A\cdot C-\frac{C^2}{2B}\right)\cdot\left(e^{\frac{2h}{C}}-1\right)+\frac{C}{B}\cdot h \tag{V2}$$

$$a=\left(A-\frac{C}{2B}\right)\cdot\left(e^{\frac{2h}{C}}-1\right)+\frac{C}{2B}$$

Die Geschwindigkeit-Weg-Funktionen verfügen über praktische Bedeutung. Diese bestimmen z. B. in welchem Punkt der vom Korb hinterlegten Strecke die die Bremskraft entwickelnde mechanische Bremse betätigt werden soll, damit der Korb an der Endsohle anhält. Durch einen von der Welle der Antriebsscheibe angetriebenen Fahrtreglers kann die Bremse auch automatisch betätigt werden.

Mit Hilfe der Geschwindigkeit-Weg-Funktion kann auch die zum Befahren des Weges benötigte Zeit berechnet werden, da es gilt: $v=\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}$. Die Aufgabe kann explizit nicht gelöst werden, aber mit der Näherungsrechnung der Form von $\Delta t_i=\frac{\Delta h_i}{v_i}$ kann der zu dem entsprechend gewählten Streckenabschnitt Δh_i gehörige Δt_i Zeitabschnitt berechnet werden. Der Wert von v_i wird nach Einsetzen in die Zusammenhänge der summierten Wegabschnitte $h_i = \sum_0^i \Delta h_i$(V) und des Geschwindigkeit-Weg-Ausdruckes (V2) erhalten. Die bis zum Erreichen der Korbgeschwindigkeit von v_i und bis zum Hinterlegen des Weges h_i benötigte Gesamtzeit ergibt sich durch $t_i=\sum_0^i \Delta t_i$ wodurch im Bedarfsfall die Werte Näherungsfunktionen $v(t)$, $a(t)$ und $h(t)$ in einer beliebigen Anzahl ermittelt werden können.

Die *Abb. 3* beinhaltet solche Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme unter Berücksichtigung der folgenden Zahlenwerte:

— Förderweg: $H=400$ m
— Fördergutmasse: $R=2000$ kg
— Masse des leeren Korbes: $K=2000$ kg
— Masse des Grundgegengewichtes: $E=K-\frac{R}{2}=2000-1000=1000$ kg
— Masse des antreibenden Übergewichtes: $N=\frac{R}{2}=1000$ kg

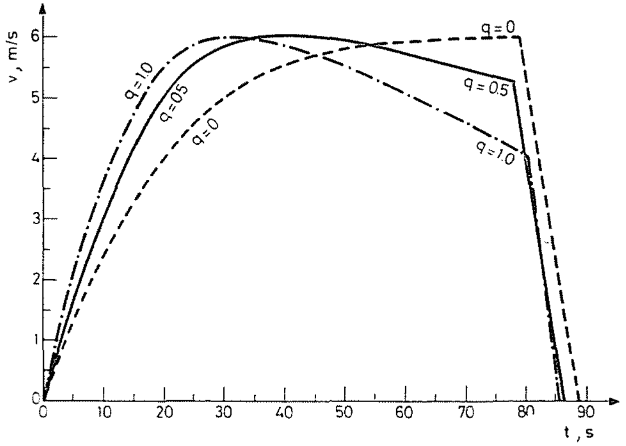

Abb. 3

— als Gegengewicht benötigte Wasserdosis: $Q = R = 2000$ kg bzw. die zweifache derselben: $2Q = 4000$ kg
— translatorisch bewegenden Massen: $m = 24\,000$ kg
— Gesamtschachtwiderstand des Korbes und des Gegengewichtes: $Z = 4000$ N;
— von der mechanischen Bremseinrichtung am Treibscheibenumfang ausgeübte Bremskraft bei zweifacher ($b = 2$) Bremssicherheit: $F = b \cdot N \cdot g = 2 \cdot 1000 \cdot g = 2000 \cdot g$ N

Die Differenz der Massen des Ober- und des Unterseiles $q = q_A - q_0$, und die Koeffizienten C_v kg/m und C m des Ventilators können von uns gewählt werden. So können wir einerseits aus Sicherheits- und Zweckmäßigkeitsgründen die maximale Geschwindigkeit mit $v_0 = 6$ m/s annehmen, andererseits können wir den Geschwindigkeitsverlauf — wenigstens innerhalb bestimmten Grenzen — selbst gestalten.

Die Werte des in der Abb. 3 aufgezeichneten Diagramme haben wir mit den Wertepaaren $q = 0$, $C = 150$ m; $q = 0{,}5$ kg/m, $C = 144$ m und $q = 1{,}0$ kg/m $C = 122$ m berechnet.

Die Zusammenhänge können auch im Falle eines Unterseiles mit ausgeglichenem Gewicht ($q = 0$) verwendet werden. In diesem Fall vereinfacht sich aber unsere Differentialgleichung, für die Zeitfunktionen erhalten wir exakte Lösungen. So gestaltet sich die Geschwindigkeit-Zeit-Funktion

beim Anfahren zu $$v = \sqrt{A \cdot C} \cdot \text{th} \sqrt{\frac{A}{C}} \cdot t$$

beim Anhalten zu $$v=\sqrt{A\cdot C}\cdot \operatorname{tg}\sqrt{\frac{A}{C}}\cdot t \qquad \text{(Rückwärts)}$$

Es ist ersichtlich, daß eine kleinere Seilmassendifferenz eine konstantere Geschwindigkeit sichert. Im Falle eines ausgeglichenen Unterseiles ($q=0$) — zwar verflacht — nimmt aber die Geschwindigkeit bis zum Ende (der Bewegung) zu. Bei größeren Differenzen tritt aber während der Anfahrt eine größere Beschleunigung auf und gegen Ende der Fahrt verringert sich die Geschwindigkeit entscheidend. Im Bedarfsfall kann sich so am Ende der Fahrt der Korb mit einer aus Sicherheitsgründen vorgeschriebenen kleineren Geschwindigkeit (z. B. 4 m/s) bewegen.

Die beschriebene äußerst einfache und hinsichtlich des Schlagwettergefahres die vollkommene Sicherheit bietende Förderungsart benötigt eigentlich keinen Antriebsmotor und kein kompliziertes Regelsystem, doch können mit Hilfe einiger leicht realisierbaren Einrichtungen: wie eines Ventilators, des Gewichtes des Unterseiles sowie durch eine entsprechende Parameterannahme einer einfachen mechanischen Bremseinrichtung die Realisation der vorgeschriebenen Werte der maximalen Geschwindigkeit und der Durchlaufgeschwindigkeit gesichert werden.

Zusammenfassung

Im Beitrag wird zu der in den schlagwettergefährlichen Blindschachten durchgeführten Förderung ein einfaches, aber vollkommene Sicherheit bietendes Schachtförderungssystem vorgeschlagen.

Literatur

1. PATTANTYÚS Á. G.: Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve (Handbuch für Elektro- und Maschinenbauingenieure), Bd. III. (Kap. A, B, D) Bd. IV. (Kap. B, H), Müszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961—62. (im ungarischer Sprache)
2. VANKÓ R.: Anyagmozgató gépek tervezési alapjai (Entwurfsgrundlagen von Fördermaschinen) Tankönyvkiadó, Budapest, 1968. (in ungarischer Sprache)
3. ECK, B.: Ventilatoren, Springer-Verlag

Prof. Richárd VANKÓ 1026 Budapest Lotz K. u. 5/b