

DK 621 - 5

## Über den Regelkreis Mensch – Maschine

Von **Horst Hesse**, Braunschweig-Völkenrode<sup>1)</sup>

Viele Bedienungsvorgänge, die der Mensch an Maschinen ausführt, stellen prinzipiell Regelkreise dar. Der Mensch bildet dabei den Regler, während die Maschinen die Regelstrecken darstellen. Um die Vorgänge in solchen Regelkreisen beschreiben zu können und damit eine optimale Auslegung zu ermöglichen, muß neben dem Übertragungsverhalten der maschinellen Komponenten auch das des Menschen bekannt sein. Es wird das Reglerverhalten des Menschen an Hand von mathematischen Modellen beschrieben und an einem landtechnischen Beispiel einige praktische Folgerungen für die zweckmäßige, dem menschlichen Übertragungsverhalten angepaßte Konstruktion von Regelstrecken erörtert.

### 1 Einleitung

In vielen Bereichen der Technik tritt eine besondere Art von Regelkreisen — sogenannte Handregelkreise — auf, in denen der Mensch den Regler und eine Maschine die Regelstrecke darstellen. Das Fliegen von Flugzeugen, das Autofahren, das Lenken von Landmaschinen oder das Nachführen von Pflege- oder Rodeelementen an Pflanzenreihen sind Beispiele dafür. Solange solche Vorgänge nicht automatisiert werden können, muß der Ingenieur die Regelstrecken, also die Maschinen oder ihre Elemente, auf das Leistungsvermögen des Reglers Mensch so abstimmen, daß optimale Werte für die Schnelligkeit, Genauigkeit und Sicherheit der Regelung sowie eine geringe Belastung des Menschen erreicht werden, was heute häufig nicht der Fall ist. Zur Lösung dieser Aufgabe ist die Kenntnis der Fähigkeiten und Grenzen des Reglers Mensch erforderlich.

In den beiden letzten Jahrzehnten sind in den USA und in England zahlreiche Untersuchungen angestellt worden, um das Reglerverhalten des Menschen in Form einer Übertragungsgleichung wie bei technischen Reglern darzustellen. Die Anregungen dazu kommen vor allem aus dem militärischen und flugtechnischen Bereich, weil dort besonders hohe Anforderungen an Sicherheit, Schnelligkeit und Genauigkeit gestellt werden [1].

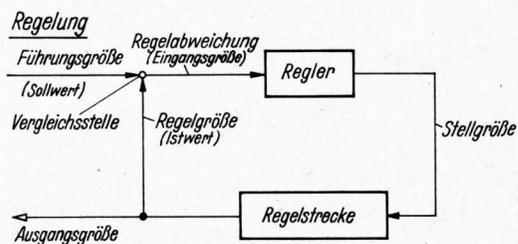
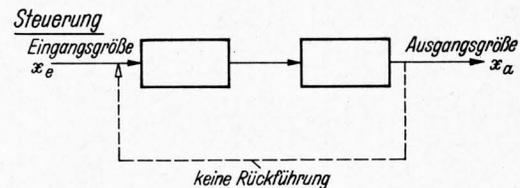
Wegen der außerordentlich großen Zahl von Parametern, die das menschliche Regelverhalten beeinflussen, ist es bislang noch nicht gelungen, ein allgemeingültiges mathematisches Modell für das Verhalten des Menschen zu entwickeln, das so wie bei technischen Reglern für die theoretische Auslegung spezieller Regelkreise benutzt werden kann. Mit den bisherigen Ergebnissen ist es aber möglich, die prinzipielle Wirkungsweise des Menschen als Regler zu beschreiben und einige Anhaltspunkte für die zweckmäßige Auslegung der maschinellen Komponenten von Handregelkreisen zu geben [2; 3].

<sup>1)</sup> Vortragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 26. Oktober 1966

Dipl.-Ing. Horst Hesse ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

### 2 Einige Grundbegriffe der Steuerungs- und Regelungstechnik

Zur Einführung sollen einige Begriffe der Steuerungs- und Regelungstechnik erläutert werden. Nach dem Normblatt DIN 19226 ist eine Steuerung als ein Vorgang definiert, bei dem eine oder mehrere Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen einer Steuerung ist der offene Wirkungsablauf, die Steuerkette, **Bild 1** (oben). Ein Beispiel dafür ist eine Steuerung der Temperatur eines Raumes, bei dem die Außentemperatur gemessen und die Heizleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur eingestellt wird. Die gesteuerte Größe, die Raumtemperatur, wird dabei nicht gemessen (keine Rückführung!).



**Bild 1.** Unterschied zwischen Steuerung und Regelung.

Eine Regelung dagegen ist definiert als ein Vorgang, bei dem eine Größe — nämlich die zu regelnde Größe — fortlaufend gemessen und durch Vergleich mit einer anderen Größe im Sinne einer Angleichung an diese beeinflusst wird. Der Wirkungsablauf vollzieht sich in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis. **Bild 1** (unten) zeigt einen Regelkreis mit den darin auftretenden Größen. Bei Bedienungsvorgängen, die der Mensch an Maschinen ausführt, handelt es sich prinzipiell meist um Regelungen. Solche Handregelungen können sowohl unstetig (diskontinuierlich) sein, wenn der Eingriff in größeren Abständen erfolgt, sie können aber auch stetig (kontinuierlich) sein, wenn der Mensch ununterbrochen eingreifen muß. Auf letztere beziehen sich die folgenden Ausführungen.

**Bild 2** zeigt einige Differentialgleichungen und Übertragungsfunktionen von einfachen Regelkreisgliedern, die weiter unten mehrfach auftreten und erläutert werden. In der Nachrichten- und Regelungstechnik ist es üblich, das Übertragungsverhalten mit Hilfe von komplexen Übertragungsfunktionen zu beschrei-



	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion $F(p)$
Proportionalglied 0. Ordnung (starrer Hebel)	$x_a = K_p x_e$	$K_p$
Proportionalglied 1. Ordnung (Feder-Dämpfung)	$T_1 \dot{x}_a + x_a = x_e$	$\frac{1}{T_1 p + 1}$
Proportionalglied 2. Ordnung (Feder-Masse-Dämpfung)	$T_2^2 \ddot{x}_a + T_1 \dot{x}_a + x_a = x_e$	$\frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$
Integrierglied	$x_a = \int x_e dt$	$\frac{1}{p}$
Differenzierglied	$x_a = T_D \dot{x}_e + x_e$	$T_D p + 1$
Totzeitglied	$x_a = x_e(t - T_t)$	$e^{-T_t p}$

Bild 2. Übertragungsfunktionen elementarer Regelkreisglieder.

- $K_p$  Übertragungsfaktor
- $T_{1,2}$  Verzögerungszeitkonstanten
- $T_D$  Vorhaltzeit
- $T_t$  Totzeit
- $p$  komplexe Veränderliche

ben, weshalb sie auch hier verwendet werden [4]. Der Aussagegehalt der Übertragungsfunktionen ist der gleiche wie der der Differentialgleichungen, sie vereinfachen aber die Durchführung von schwierigen Rechenoperationen, wie z. B. das Integrieren. Die Übertragungsfunktionen werden durch eine Transformation, die sogenannte Laplace-Transformation, aus den zeitabhängigen Differentialgleichungen gewonnen:

$$F(p) = \frac{\mathcal{L}[x_a(t)]}{\mathcal{L}[x_e(t)]} = \frac{x_a(p)}{x_e(p)}$$

$\mathcal{L}$  ist das Symbol für die Laplace-Transformation, die rein formal dadurch vollzogen wird, daß in den Differentialgleichungen der Operator  $d/dt = p$  gesetzt wird. Die Veränderliche  $p = \sigma + i\omega$  ist eine komplexe Größe ( $\sigma$  Realteil,  $i\omega$  Imaginärteil). Ist  $p$  rein imaginär, dann geht die Übertragungsfunktion in den bekannten Frequenzgang über.

### 3 Der Mensch als Regler

Der Grundgedanke, von dem die Beschreibung des Menschen als Regler ausgeht, ist der, ihn als Übertragungselement aufzufassen, das auf Grund bestimmter, mit den Sinnen wahrgenommener Eingangsgrößen davon abhängige Ausgangsgrößen mit seinen Stellgliedern, den Armen oder Beinen, abgibt. Das Ziel ist, den gesetzmäßigen zeitlichen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, d. h. seine Übertragungsfunktion, darzustellen. Würde man die Übertragungsfunktion des Menschen für einen speziellen Handregelkreis kennen, dann wäre es möglich, die optimale Konstruktion der maschinellen Bestandteile durch Simulation (auf einem Analogrechner) zu bestimmen.

Faßt man den Menschen als Übertragungselement auf, dann bietet sich die direkte Analogie zu technischen Reglern an, die in der Regel aus Meßgliedern, Rechenelementen und Stellgliedern bestehen. Die Meßglieder des Menschen sind seine Sinne; den Rechenelementen entspricht der Verstand, und seine Arme und Beine sind die Stellglieder.

Mit den Sinnen nimmt er in Regelkreisen die Abweichungen der Regelgrößen von den Sollwerten wahr, dann entscheidet der Verstand über die Maßnahmen, die zur Beseitigung der Abweichung notwendig sind, und gibt entsprechende Befehle über die motorischen Nerven an die Stellglieder weiter. Die Stellglieder

betätigen über Hebel oder Handräder die Regelstrecke und wirken damit auf die Regelgröße ein, wodurch der Regelkreis geschlossen wird. Bild 3 zeigt das Blockschaltbild eines Mensch-Maschine-Regelkreises, in dem der Mensch in seine drei Hauptfunktionselemente unterteilt ist. Der Einfachheit halber ist ein einschleifiger Regelkreis gezeigt. In Wirklichkeit ist der Mensch, wenn er eine Maschine bedient, mit allen Sinnen in den Regelkreis eingekoppelt. Durch einen Willensakt selektiert er die Signale, die für die jeweilige Aufgabe wichtig sind.

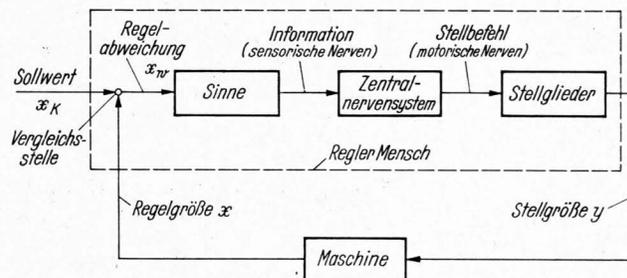


Bild 3. Der Mensch als Regler.

Eine allgemeingültige modellmäßige Beschreibung des menschlichen Verhaltens ist außerordentlich schwierig, weil der Mensch nicht eine einzige Übertragungsfunktion wie ein einmal eingestellter Regler hat, sondern je nach Art der Eingangsgrößen und dem Übertragungsverhalten der jeweiligen Regelstrecken ein breites Spektrum von verschiedenen Übertragungsfunktionen annehmen kann. Außerdem ist die Übertragungsfunktion des Menschen auch zeitlich nicht konstant und von Mensch zu Mensch verschieden (Ermüdungserscheinungen, Aufmerksamkeit, Konstitution). Die hier beschriebenen Übertragungsfunktionen stellen deshalb immer sowohl zeitliche Mittelwerte als auch Mittelwerte von verschiedenen Personen dar. Die Übertragungsfunktionen müssen mit statistischen Methoden ermittelt werden, die einen hohen rechnerischen und apparativen Aufwand erfordern. Als Testfunktionen müssen dabei regellose Eingangsgrößen benutzt werden, weil deterministische Signale (z. B. Sinussignale mit konstanter Amplitude und Frequenz) von der Testperson sehr schnell erlernt werden würden. Das heißt, der Verlauf einer solchen Testfunktion wird im Gedächtnis gespeichert, und die Versuchsperson führt mit ihren Stellgliedern nur rhythmische Bewegungen aus, ohne daß eine echte Informationsverarbeitung stattfindet.

### 4 Modelle für den Regler Mensch

#### 4.1 Stetig lineares Modell

Im folgenden werden zwei bekannte Modelle für das Übertragungsverhalten des Menschen als Regler behandelt, ein stetiges und ein Abtastmodell. Die Übertragungsfunktion des stetigen Modells lautet [5 bis 7]:

$$F(p) = \frac{e^{-T_t p}}{[T_N p + 1]} \frac{K_p [T_L p + 1]}{[T_I p + 1]} \quad (1)$$

Die Glieder der Funktion haben folgende Bedeutung: Der Zähler des ersten Gliedes stellt eine Totzeit dar; es ist die bekannte Reaktionszeit des Menschen. Diese Totzeit tritt immer dann auf, wenn die Eingangsgrößen unvorhersehbar, also regellos sind. Die Totzeit setzt sich zusammen aus Wahrnehmungs- und Entscheidungszeit. Die Wahrnehmungszeit ist bei optischer Wahrnehmung vor allem eine Funktion der Intensität der Sichtinformation und der Größe der Abweichung, während die Entscheidungszeit im wesentlichen von der Zahl der Wahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Signalen abhängt. In [2] ist für die Abhängigkeit der Totzeit von der Zahl der Signale, auf Grund deren eine Bedienungsperson handeln muß, eine Näherungsformel angegeben:

$$T_t = c \log(n + 1) \quad (2)$$

darin ist  $c$  eine Konstante, die im Bereich 0,5 bis 0,65 schwankt,  $n$  ist die Anzahl der Signale. Ist nur ein Signal vorhanden, dann ergibt sich für  $T_t$  ein Bereich von 0,15 bis 0,2 s. Die Reaktionszeit  $T_t$  hängt außerdem vom jeweiligen Sinneskanal ab, mit

dem ein Signal wahrgenommen wird. Sie ist für Hören und Berührung etwa 20% kleiner als für Sehen. Im Vergleich zu anderen Größen schwankt die Totzeit nicht sehr stark.

Der Nenner des ersten Gliedes in Gl. (1) stellt eine Verzögerung erster Ordnung dar, die im Nerven- und Muskelsystem des Menschen entsteht. Die Größe der Zeitkonstanten  $T_N$  dieses Gliedes hängt vor allem von der Art der Eingangsgröße ab und kann im Bereich von 0,01 bis 1,0 s schwanken, sie wird um so kleiner, je höher die Frequenzen des Eingangssignales sind. Dieses erste Glied tritt bei zufälligen Eingangsgrößen immer auf und ist, gemessen an dem zweiten Glied, relativ konstant. Man kann es deshalb als Grundform bezeichnen.

Das zweite Glied besteht aus einem Proportionalitätsfaktor  $K_p$ , einem Vorhaltglied erster Ordnung im Zähler und einem Verzögerungsglied erster Ordnung im Nenner des Bruches. Dieses Glied wird als Anpaßterm des Menschen bezeichnet; denn durch Wahl der darin auftretenden Größen  $K_p$ ,  $T_L$  und  $T_I$  paßt der Mensch sich während eines Lernprozesses an eine gegebene Regelstrecke und an verschiedene Betriebsbedingungen an (z. B. Lenken eines Fahrzeuges bei verschiedenen Geschwindigkeiten, bei trockener oder vereister Fahrbahn). In diesem Glied zeigt sich das Wirken des menschlichen Verstandes sowie seine Ausbildung und Erfahrung. Der Anpaßterm kann in einfachen Fällen auf einen Faktor zusammenschrumpfen, in schwierigen Fällen aber auch noch komplizierter werden, als er in der gezeigten Übertragungsfunktion dargestellt ist. Der Faktor  $K_p$  enthält außer dem Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsgröße für den statischen Zustand auch die verschiedenen Dimensionen von Eingangs- und Ausgangsgröße. Ist z. B. bei einer Lageregelung eine Abweichung von 2 cm vorhanden, für deren Beseitigung ein Stellhebel 10 cm verstellt werden muß, dann ist  $K_p = 5 \text{ cm/cm}$ . Ist dagegen bei einer Geschwindigkeitsregelung eines Fahrzeuges zur Steigerung der Geschwindigkeit um 10 km/h ein Gaspedalweg von 0,5 cm erforderlich, dann ist  $K_p = 0,05 \text{ cm/km/h}$ . Die Zeitkonstante  $T_L$  kann Werte bis zu 2 bis 3 s annehmen, während die Zeitkonstante  $T_I$  im Bereich von 0,1 bis 0,3 s liegen kann.

Die selbsttätige Anpassung des Menschen an verschieden geartete Regelstrecken erfolgt mit dem Ziel, ein stabiles Verhalten des geschlossenen Kreises zu erhalten und die Abweichungen von den Sollwerten möglichst klein zu machen. Diese Eigenschaft des Menschen stellt eine große Überlegenheit gegenüber einfachen technischen Systemen dar. Der Mensch ist so gesehen das Urbild eines sich selbst anpassenden Reglers. Er kann aber nicht im ganzen Bereich der ihm möglichen Übertragungsfunktionen gleich gut und sicher arbeiten, sondern je einfacher die von ihm verlangte Übertragungsfunktion ist, d. h., je weniger Rechenoperationen, wie Integrationen oder Differentiationen er durchführen muß, um so sicherer und genauer und um so weniger anstrengend kann er seine Aufgabe erfüllen. Anders ausgedrückt heißt das, daß für den Bedienungsmann die Regelstrecken am leichtesten zu regeln sind, bei denen er mit einer einfachen Form seiner eigenen Übertragungsfunktion auskommt. Die Regelstrecken von Handregelkreisen sollten deshalb nach Möglichkeit so ausgelegt werden, daß der Mensch als Regler nur die Aufgabe eines einfachen Verstärkers hat, d. h., daß die Zeitglieder des Anpaßtermes verschwinden.

Bild 4 zeigt eine Übergangsfunktion des Menschen [8], die experimentell aufgenommen wurde. Dabei wurde der Versuchsperson eine sprungförmige Abweichung mit unbekannter Richtung und Amplitude vorgegeben, und ihre Aufgabe bestand darin, einen Hebel um den Betrag der Abweichung zu verstellen. Im Nullpunkt des Koordinatensystems wird ein Startzeichen gegeben, die sprungförmige Abweichung, die mit dem Startzeichen sichtbar wird, beträgt 100 mm. Der Stellvorgang beginnt nach 0,165 s und ist nach 0,36 s beendet. Die Totzeit beträgt also 0,165 s und die Stellbewegungszeit erfordert etwa 0,2 s.

Nach [2] beträgt die Zeit für den gesamten Übergangsprozeß

$$T_R = c \log(n + 1) + T_S \quad (3),$$

wobei  $T_S$  die Stellbewegungszeit ist. Mit den oben errechneten Werten für  $T_t$  wird  $T_R = 0,15 \text{ bis } 0,2 + T_S \text{ s}$ . Die Stellbewegungszeit  $T_S$  hängt vom Stellweg und vom Widerstand der

Stellhebel oder Handräder ab. Zum Beispiel können Steuerknüppel im Flugzeug mit einer maximalen Geschwindigkeit bis zu 1,8 m/s am Griff verstellt werden, wenn der Widerstand kleiner als 15 kp ist. Bei einem Widerstand von 45 kp beträgt die maximale Stellgeschwindigkeit dagegen nur noch 0,25 m/s. Der Stellweg geht unterproportional in die Stellzeit ein, weil die maximale Stellgeschwindigkeit mit steigendem Stellweg zunimmt.

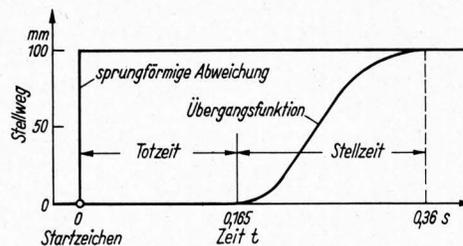


Bild 4. Experimentell ermittelte Übergangsfunktion eines Menschen (nach Kießmüller [8]).

Das stetig lineare Modell stellt eine erste Näherung des wirklichen Verhaltens des Menschen dar. In Wirklichkeit ist der Mensch wahrscheinlich kein stetig übertragendes System. Es soll deshalb noch ein von Bekey [9] erarbeitetes Abtastmodell behandelt werden, in dem ein unstetiges Glied zum stetigen Modell hinzugefügt worden ist, mit dem eine bessere Näherung des wirklichen menschlichen Verhaltens erreicht wurde.

#### 4.2 Das Abtastmodell

Verschiedene Phänomene, die bei der Untersuchung des Menschen als Übertragungselement aufgetreten sind, lassen sich nicht mit einem stetigen Modell beschreiben. So treten beispielsweise bei der Untersuchung des Menschen in seinen Stellbewegungen außer den Frequenzen, die im Eingangssignal enthalten sind, auch noch höhere Frequenzen auf. Das kann bei einem exakt linearen Modell nicht möglich sein. Außerdem kann mit dem linearen Modell eine Eigenschaft nicht beschrieben werden, die man als Extrapolation bei verschwindendem Eingangssignal bezeichnen kann. Verschwindet das Eingangssignal aus irgendwelchen Gründen, dann behält der Mensch die Lage oder die Geschwindigkeit der Stellgröße bei, die im Zeitpunkt des Verschwindens verlangt wurde. Für ein stetiges lineares System verschwindet mit der Eingangs- aber auch die Ausgangsgröße. Darüber hinaus wird vermutet, daß die Aufnahme von Informationen durch das Bewußtsein nicht stetig, sondern in Form diskreter Werte erfolgt und daß zwischen diesen Werten keine Aufnahme von Informationen stattfindet. Man nimmt an, daß die Anzahl der wahrnehmbaren diskreten Werte in der Größenordnung von 2 bis 3 je Sekunde liegt. In der Arbeit von Bekey wurde diese Annahme bestätigt. Mit Hilfe dieses Modelles lassen sich auch die anderen Erscheinungen beschreiben.

Ein Abtastsystem tastet in bestimmten zeitlichen Abständen die Werte einer Größe, beim Regelkreis also die Abweichung, ab und hält den erstasteten Wert durch ein Halteglied bis zum nächsten Tastzeitpunkt fest. Bild 5 zeigt die prinzipielle Wir-

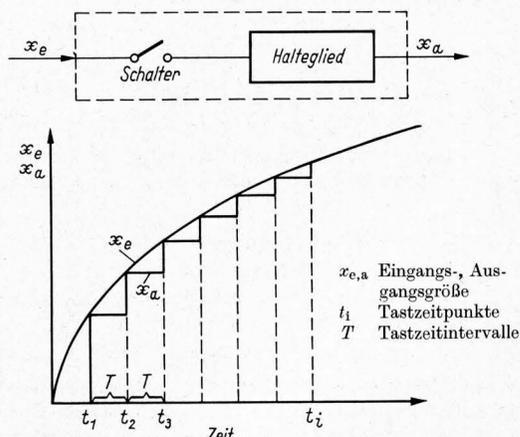
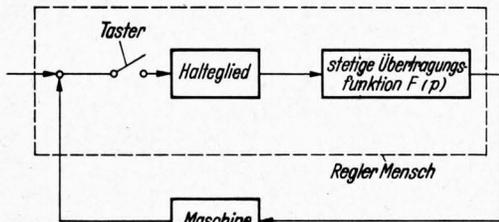


Bild 5. Funktion eines Abtastsystems.

kungsweise eines Abtastgliedes. Das Blockschaltbild des von *Bekey* angenommenen Abtastmodelles ist in **Bild 6** gezeigt, seine Übertragungsfunktion lautet:

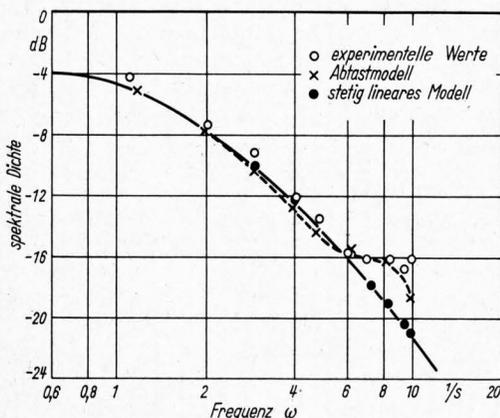
$$F(p) = \frac{1 + T p}{T} \left( \frac{1 - e^{-T p}}{p} \right)^2 \frac{K_p e^{-T_t p}}{1 + T_N p} \quad (4),$$

worin  $T$  das Tastzeitintervall,  $T_t$  die Totzeit,  $K_p$  den Übertragungsfaktor und  $T_N$  eine Verzögerungszeitkonstante bedeuten. In **Bild 6** vollführt der Relaiskontakt die Tastungen, und der erste Block stellt das Halteglied dar. Der zweite Block symbolisiert die Grundform der stetigen Übertragungsfunktion. Der Anpaßterm ist nicht vorhanden, da einfache Übertragungsfunktionen der Versuchsapparatur verwendet wurden, bei denen der Anpaßterm nicht auftrat. In der Übertragungsfunktion ist ein additives Glied zur Grundform des linearen Anteils des Menschen hinzugefügt, das ein Halteglied erster Ordnung beschreibt. Bei den Versuchen von *Bekey* war  $T = 0,33$  s.



**Bild 6.** Blockschaltbild des Abtastmodelles für den Regler Mensch (nach *Bekey* [9]).

**Bild 7** zeigt ein Diagramm von *Bekey*, in dem das stetige und das Abtastmodell mit dem wirklichen, in Experimenten gewonnenen Verhalten des Menschen verglichen wird. In dem Diagramm ist die spektrale Dichte der Stellgröße des Menschen, in diesem Fall die Handbewegung, über der Frequenz der Stellgröße aufgetragen. Das stetige Modell nähert im unteren Frequenzbereich bis etwa  $\omega = 6$  1/s das tatsächliche Verhalten des Menschen genauso gut an wie das Abtastmodell, aber oberhalb dieser Frequenz ergibt das Abtastmodell eine bessere Näherung.



**Bild 7.** Spektrale Dichte der Stellbewegung für Modelle und Experiment (nach *Bekey* [9]).

Zum Schluß der Beschreibung von Modellen für den Menschen als Regler sollen die wesentlichen Merkmale des menschlichen Übertragungsverhaltens noch einmal zusammengefaßt werden:

1. Die Übertragungsfunktion des Menschen ist für zufällige Eingangsgrößen immer mit einer Totzeit von 0,15 bis 0,2 s behaftet.
2. In seinem Nerven- und Muskelsystem treten nicht unterschreitbare Verzögerungen auf.
3. Die sinnliche Wahrnehmung erfolgt wahrscheinlich tastartig mit etwa 2 bis 3 diskreten Werten je Sekunde. Zwischen diesen Werten findet keine Wahrnehmung statt.
4. Eine wichtige Erscheinung, die in den Übertragungsgleichungen für das menschliche Verhalten nicht zum Ausdruck kam, ist die Ermüdung, durch die seine Leistungsfähigkeit vermindert wird und auch sein Übertragungsverhalten sich

ändert. Es ist im Augenblick nicht möglich, diese Erscheinung funktionell in Form einer Gleichung zu beschreiben, da darüber noch keine Versuchsergebnisse vorliegen, die nur in einer Vielzahl von Langzeitversuchen gewonnen werden können.

Das sind die wichtigsten Gründe, durch die die Funktion des Reglers Mensch begrenzt wird. Hinsichtlich dieser Grenzen sind ihm technische Systeme oft überlegen. Die Verzögerungszeiten von schnellen elektrohydraulischen Reglern liegen z. B. in der Größenordnung von nur 0,01 bis 0,04 s.

5. Der Mensch kann sein Übertragungsverhalten durch einen Lernprozeß an verschieden geartete Regelstrecken und Betriebszustände anpassen. Außerdem besitzen die menschlichen Sinnesorgane Eigenschaften, die mit technischen Meßsystemen schwierig, wenn überhaupt, erreichbar sind. Solche Eigenschaften sind z. B. das räumliche Sehen, das Erkennen von Form- und Farbunterschieden, die Störgeräuschselektion und -ortung bei einem bestimmten Schallpegel u. a. Diese seine großen Überlegenheiten gegenüber einfachen technischen Systemen sind der wichtigste Grund dafür, daß der Mensch heute in vielen Handregelkreisen noch nicht durch einen technischen Regler ersetzbar ist.

## 5 Einflüsse auf das Übertragungsverhalten des Menschen und ihre konstruktiven Konsequenzen

Von dem gezeigten grundsätzlichen Verhalten des Menschen als Regler ausgehend, sollen an einem Beispiel einige Folgerungen für die Konstruktion von Regelstrecken für Handregelkreise erläutert werden. Als Beispiel wird die Nachführung von Arbeitselementen an Pflanzenreihen gewählt, weil hier besonders hohe Anforderungen an die Schnelligkeit des Reglers Mensch gestellt werden und die funktionellen Zusammenhänge hier relativ einfach zu übersehen sind. Die Einflüsse, deren Bedeutung behandelt werden soll, sind:

1. Die Wahrnehmung der Regelabweichung und der zeitliche Verlauf der Führungsgrößen und
2. die Übertragungsfunktionen von Regelstrecken und die Kräfte an Stellhebeln.

### 5.1 Die Wahrnehmung der Regelabweichungen und der zeitliche Verlauf der Führungsgrößen

Beim Nachführen von Arbeitselementen an Pflanzenreihen muß der Bedienungsmann die Lage der Elemente relativ zu den Pflanzenreihen beobachten. Dabei wird eine Pflanzenreihe als Führungsgröße gewählt und über einen Führungspunkt angepeilt. Die Lage des Führungspunktes zur Pflanzenreihe ist die Regelgröße (Lageregelung). Versuche von *Kersting* [10] haben gezeigt, daß die Steuerfehler beim Hacken von Zuckerrüben mit Werkzeugen, die an einem Geräteträger fest angebaut sind, durch seitliche Fahrersitzverstellung verkleinert werden können. Da der Sichtraum in der Mitte der Fahrzeuge häufig durch den Motor oder andere Elemente versperrt wird, stehen dem Bedienungsmann, der über einen Führungspunkt die Pflanzenreihe anpeilen muß, bei mittlerer Anordnung des Sitzes nur Führungspunkte zur Verfügung, über die die Abweichung mit einer mehr oder weniger großen Paralaxe (horizontaler Blickwinkel) wahrgenommen werden kann. Deshalb ist auf jeden Fall anzustreben, daß die Blickrichtung des Bedienungsmannes zum Führungspunkt genau senkrecht über der Pflanzenreihe liegt, die als Führungsreihe gewählt wird.

Des weiteren wurde von *Kersting* und *Schünke* [10; 11] experimentell festgestellt, daß die Nachführgenauigkeit, die bei bestimmten Fahrgeschwindigkeiten erreichbar ist, vom vertikalen Blickwinkel abhängt, unter dem der Steuermann den Vorgang beobachtet, **Bild 8**. Das kann folgendermaßen erklärt werden: Während der Arbeit werden die Abweichungen der Pflanzenreihe vom Führungspunkt, wie beim Abtastmodell besprochen, abgetastet. Die Pflanzenreihe weicht im allgemeinen regellos von einer gedachten Mittellinie ab. Die statistische Verteilung der Abweichung von der Mittellinie hat *Heller* [12] für ausgewachsene Rübenpflanzen festgestellt; sie entspricht etwa einer *Gaußschen* Verteilungsfunktion mit maximalen Abweichungen

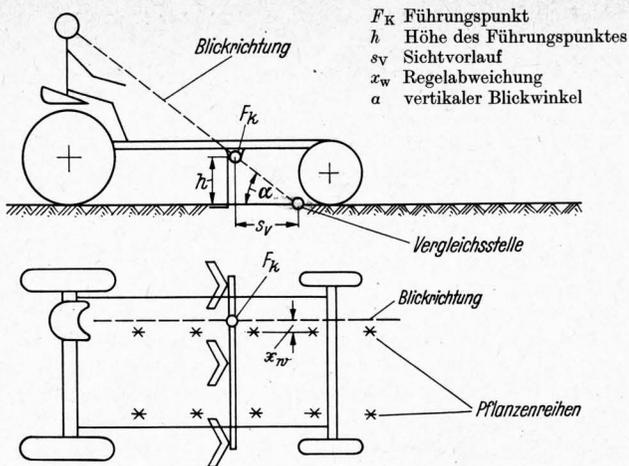


Bild 8. Sichtverhältnisse bei einem Nachführproblem.

von 4 bis 5 cm. Die Position jeder Pflanze oder jedes Punktes einer Pflanzenreihe bezüglich einer gedachten Mittellinie ist also zufällig und stellt damit für den Bedienungsmann beim Nachführen ein zufälliges Ereignis dar. Darauf kann er nur mit einer Totzeit reagieren.

Um diese Totzeit und die erforderliche Stellbewegungszeit zu kompensieren, ist ein bestimmter Sichtvorlauf erforderlich, d. h., die Information über die Abweichung des Nachführelementes von einer Pflanze muß mindestens um die Summe von Tot- und Stellbewegungszeit früher zur Verfügung stehen, als das Arbeitselement die Pflanze erreicht. Nur dann ist eine fehlerfreie Nachführung möglich. Damit ergeben sich von der Theorie her Anhaltspunkte für die Abhängigkeit des Blickwinkels von der Fahrgeschwindigkeit.

Geht man davon aus, daß beim Nachführen maximale Abweichungen zwischen zwei Pflanzen von etwa 5 cm ausgeregelt werden müssen (größere Abweichungen treten nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 bis 3% auf), dann ergibt sich dafür bei einer Hebelübersetzung von 2 : 1 ein Stellhebelweg von 10 cm. Das entspricht den bei der Übertragungsfunktion von Bild 4 gezeigten Verhältnissen, wenn man von den auftretenden Kräften einmal absieht. Dort betrug die Gesamtzeit für den Übergangsprozeß  $T_R = 0,36$  s. Legt man diese Zeit zugrunde, dann folgt daraus der Zusammenhang zwischen maximal zulässigem Blickwinkel und Fahrgeschwindigkeit:

$$\tan \alpha = \frac{h}{v_F T_R} \quad (5),$$

worin  $h$  die Höhe des Führungspunktes über dem Boden,  $v_F$  die Fahrgeschwindigkeit und  $T_R$  die Summe von Tot- und Stellzeit bedeuten.

In Bild 9 ist für verschiedene Höhen  $h$  die Abhängigkeit des Blickwinkels von der Fahrgeschwindigkeit nach Gl. (5) dargestellt; dabei wurde  $T_R = 0,36$  s angenommen. Die eingezeichneten Punkte sind von Schünke experimentell ermittelte Werte. Die Steuergenauigkeit hängt außer von den horizontalen und vertikalen Blickwinkeln auch noch von der Sichtentfernung, vom Sichtraum in Fahrtrichtung, von der Breite der Schutzzone bei Hackvorgängen und von anderen Größen ab. Der Gesamtkomplex dieser Zusammenhänge ist im Augenblick noch schwer zu übersehen, weil darüber nicht genügend experimentelle Ergebnisse vorliegen.

## 5.2 Die Übertragungsfunktionen von Regelstrecken und die Kräfte an Stellhebeln

### 5.2.1 Die Übertragungsfunktionen von Regelstrecken

Die Übertragungsfunktion einer Regelstrecke beschreibt den zeitlichen Zusammenhang zwischen Regelgröße und Stellgröße. Das ist für unseren Fall die Bewegung des Führungspunktes als Funktion einer Lenkrad- oder Stellhebelverstellung.

Es sollen im folgenden zwei für die Nachführung im landtechnischen Bereich charakteristische Fälle von Regelstrecken und ihre Kombination untersucht werden:

1. die bei Feinsteuernungen verwendete proportionale Hebelverstellung von Elementen,
2. die Führung der fest angebauten Elemente durch die Achschenkellenkung der Maschinen und
3. die Kombination der proportionalen Verstellung der Elemente mit der Fahrzeuglenkung.

Bei der proportionalen Verstellung von Elementen ist die Lageänderung des Führungspunktes direkt proportional der Hebelbewegung. Die Größe des Übertragungsfaktors von proportionalen Strecken (Hebelübersetzung) wird in erster Linie nach den Stellkräften bemessen. Für die Bestimmung des Übertragungsfaktors sind aber nicht allein die Kräfte maßgebend, sondern es gibt für jedes Nachführsystem einen optimalen Übertragungsfaktor, der vor allem von der Größe der Abweichung von der erforderlichen Nachführgenauigkeit und vom Sichtabstand abhängt. Er muß für jeden Fall experimentell ermittelt werden. Wolfe hat solche Untersuchungen durchgeführt [13]. Dabei zeigte sich aber nur ein geringer Einfluß des Übertragungsfaktors auf die Steuergenauigkeit.

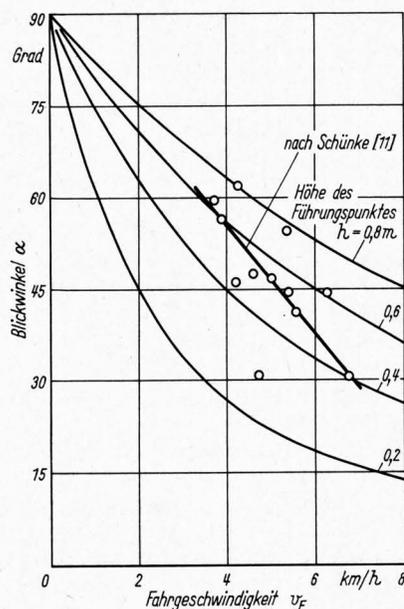


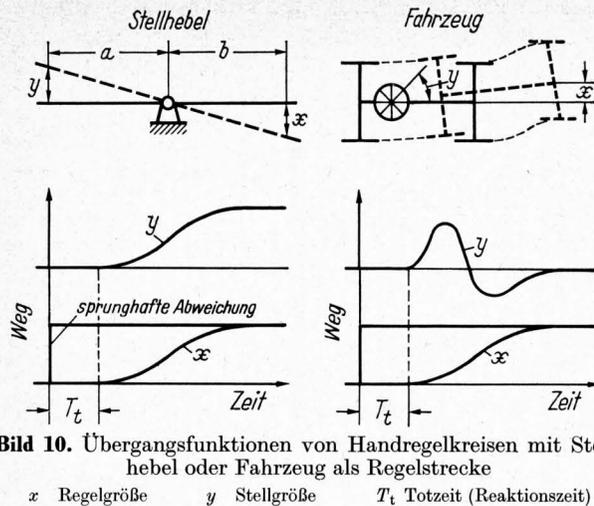
Bild 9. Erforderlicher vertikaler Blickwinkel als Funktion der Fahrgeschwindigkeit.

Das proportionale Übertragungsgesetz ist das prinzipiell einfachste. Damit werden bei sprungförmigen Abweichungen sowohl höchste Steuergenauigkeiten als auch die geringsten Belastungen für den Bedienungsmann erreicht. Der Mensch kommt dabei mit einer einfachen Form seiner Übertragungsfunktion meist mit der Grundform aus. Für eine sprungförmige Abweichung wird sich für proportional übertragende Strecken eine Stellgrößenübergangsfunktion ergeben, die der in Bild 4 gezeigten entspricht. Betrachtet man dagegen die Übertragungsfunktion der Stellgröße (Steuerausschlag), die erforderlich ist, um ein achschenkelenktes Fahrzeug bei einer sprunghaften Abweichung in die neue Sollposition zu bringen, dann zeigt sich, daß dieser Prozeß vom Bedienungsmann sehr viel schwieriger ausführbar ist. Bild 10 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Übergangsfunktionen der Regelgröße  $x$  und den zugehörigen Verlauf der Stellgröße  $y$  für beide Fälle. Die Übertragungsfunktionen der Regelstrecken lauten:

$$\text{Stellhebel: } F(p) = K_p = \frac{b}{a} = \frac{x}{y} \quad (6)$$

$$\text{Fahrzeug: } F(p) = \frac{K_p (T_{11} p + 1)}{p (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} = \frac{x}{y} \quad (7).$$

Die Übertragungsfunktion des Fahrzeuges ist in [14] und in ähnlicher Form auch in [15] angegeben. Es zeigt sich sehr klar, daß bei dem gelenkten Fahrzeug eine kompliziertere Aufgabe für den Steuermann entsteht als bei proportionaler Verstellung und daß, was in Bild 10 nicht zum Ausdruck kommt, eine größere

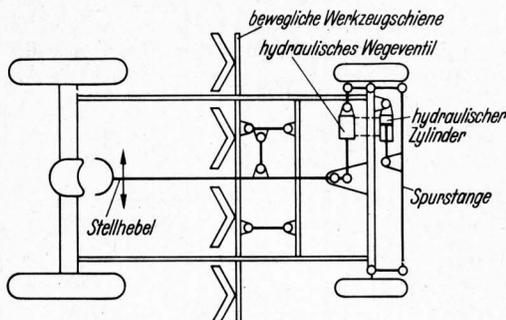


**Bild 10.** Übergangsfunktionen von Handregelkreisen mit Stellhebel oder Fahrzeug als Regelstrecke  
 $x$  Regelgröße  $y$  Stellgröße  $T_t$  Totzeit (Reaktionszeit)

Zeit dafür beansprucht wird (zweimal Stellbewegungsumkehr). Der Mensch benötigt dafür eine kompliziertere eigene Übertragungsfunktion, wodurch sowohl seine Belastung als auch die Ungenauigkeit der Regelung erhöht wird.

Grundsätzlich hängt die Zahl der Richtungsumkehrungen der Stellbewegung von den in der Übertragungsfunktion der maschinellen Komponenten enthaltenen Integrationen ab. Sie erhöht sich für jede Integration um 1, wenn es sich um rein sprunghafte Eingangsgrößen handelt. Die Übertragungsfunktionen des Fahrzeuges nach Bronstein [14] reduziert sich für niedrige Fahrgeschwindigkeiten auf eine zweifache Integration, d. h., die Regelgröße  $x$  ist dem zweifachen Integral der Stellgröße  $y$  proportional. Da der gezeigte Verlauf von  $x$  erwünscht ist, muß der Steuermann eine zweifache Differenzierung durchführen, um das dafür erforderliche Stellsignal abzugeben. Bild 10 zeigt diesen Zusammenhang.

Zur Erleichterung der Steuerarbeit für den Bedienungsmann und zur Erhöhung der Genauigkeit ist deshalb grundsätzlich eine Werkzeugverstellung mit proportionalem Verhalten für sprunghafte Abweichungen die bestmögliche. Eine quasi proportionale Verstellung kann auch für Einmannarbeit dadurch realisiert werden, daß die Verstellung der Arbeitselemente relativ zur Maschine mit der Lenkung der Vorderräder durch einen Regelkreis gekoppelt wird. In ähnlicher Form wurde ein solches System bereits von Wolfe [13] vorgeschlagen. Ein Beispiel für ein solches System ist im Prinzip in Bild 11 gezeigt. Dort sind die Arbeitselemente am Rahmen der Maschine beweglich angeordnet und werden direkt mit einem Hebel vom Steuermann proportional verstellt. Mit dem Stellhebel ist ein hydraulisches Steuerventil verbunden, das bei Verstellung des Stellhebels die Steuerung des Fahrzeuges über einen Hydraulikzylinder betätigt und es langsam in Richtung der Abweichung nachführt. Eine solche Kopplung der Lenkung mit dem Stellhebel ist im einfachsten Fall auch mechanisch möglich, wenn die Spurstange mit entsprechender Übersetzung direkt mit dem Stellhebel verbunden wird. Der Fahrer wird die Korrekturbewegung des Fahrzeuges natürlich auch wieder ausgleichen müssen. Wichtig ist, daß das Nachführen des Fahrzeuges sehr langsam erfolgt. Als Richtwert für die seitliche Bewegung des Fahrzeuges kann



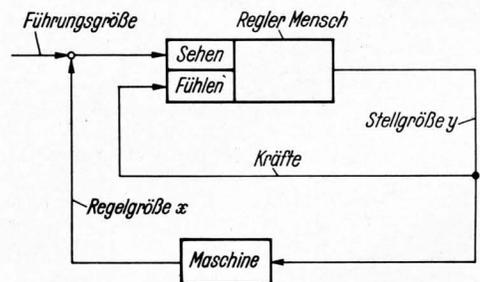
**Bild 11.** Proportionale Werkzeugverstellung mit Fahrzeuglenkung hydraulisch gekoppelt.

für Hackvorgänge gelten, daß diese Bewegung innerhalb der Zeit, die ein Einstellvorgang benötigt, kleiner sein muß als die halbe Schutzzonebreite. Dann kann der Fahrer das System so bedienen wie ein einfaches proportionales System.

### 5.22 Kräfte an Stellhebeln

Ähnlich wie das Zeitverhalten von Strecken haben auch die charakteristischen Größen der Stellhebel, wie Kräfte und Wege, einen Einfluß auf das menschliche Übertragungsverhalten. Die beiden denkbaren Extreme, die weglose Kraftsteuerung und die kraftfreie Wegsteuerung, werden als sehr ungünstig empfunden. Das gleiche gilt für trockene Reibung, Spiel in den Gelenken und für nichtlinearen Kraftanstieg. Am günstigsten sind Wegstellungen unter Kräfteinwirkung, wobei die Kräfte in einer linearen Beziehung zum Stellweg oder seinen Ableitungen stehen sollten, was bei Feder- und Massenkraften und geschwindigkeitsproportionalen Reibungskraften der Fall ist.

Die Vorteile vorhandener Massen im Regelsystem sind zweifacher Art. Einmal sind sie ein direktes Maß für die Beschleunigung der Stellgröße, zum anderen haben die Massenkraften einen dämpfenden und stabilisierenden Einfluß auf die Stellbewegung des Steuermannes. Sie erschweren allerdings eine schnelle und präzise Einstellung. Geschwindigkeitsproportionale Reibungskraften geben dem Steuermann ein Gefühl für die Stellgeschwindigkeit und haben, ähnlich wie die Massenkraften, einen dämpfenden Einfluß auf seine Stellbewegungen. Die Feder- oder Rückstellkräfte vermitteln ein Gefühl für den Stellweg und führen das Stellglied von selbst in den Nullpunkt zurück. Die an den Stellhebeln auftretenden Kräfte haben vor allem den Nutzen, daß sie dem Menschen ein Gefühl für die Regelstrecke vermitteln, außerdem werden die Kräfte über die Spannungsrezeptoren der Muskeln schneller wahrgenommen als optische Informationen. Das Kraftgefühl stellt so gesehen eine Art Hilfsregelkreis dar, Bild 12, der das Verhalten des meist optischen Hauptkreises verbessert. Der Steuermann erhält über Geschwindigkeit und Beschleunigung der Stellgröße zusätzliche Informationen, also über Größen, die optisch schwieriger wahrnehmbar sind.



**Bild 12.** Handregelkreis mit optischer und mit Kraft-Rückführung (nach Fiala [17]).

### 6 Schlußbetrachtung

Mit zunehmender Kompliziertheit der Maschinen und Apparate, die der Mensch bedienen muß, wächst seine Belastung bei der Ausübung von Kontrollfunktionen. Es sollte deshalb das Bestreben des Ingenieurs sein, den Arbeits- und Bedienungskomfort soweit wie möglich zu erhöhen. Dafür ist es notwendig, die Maschinen mehr als bisher den physischen und psychischen Gegebenheiten des Menschen anzupassen. Es gibt bereits eine Vielzahl von Ergebnissen über den Gesamtkomplex Mensch und Maschine, die zum großen Teil noch keinen Eingang in das Denken und Planen der Ingenieure gefunden haben [16]. Unter anderem gehört dazu auch die Berücksichtigung der Fähigkeiten des Menschen, als Regler zu funktionieren, d. h., Sinnesinformationen in mechanische Stellbefehle umzusetzen.

Die Forschungsergebnisse über den Menschen als Regler sind bislang vornehmlich für den flug- und wehrtechnischen Bereich verwendet worden. Sie sind aber auch auf andere Gebiete, wo Mensch-Maschine-Regelkreise auftreten, übertragbar. Fiala [17] hat z. B., ausgehend von der stetig linearen Übertragungsfunktion des Menschen, die Aufgabe des Autofahrens als kybernetisches Problem behandelt und mit einem Analogrechner simuliert.

Die Fähigkeiten des Reglers Mensch sind vor allem hinsichtlich seiner Reaktionsgeschwindigkeit begrenzt. Reichen für bestimmte Vorgänge die Fähigkeiten des Menschen nicht mehr aus, dann muß seine Funktion durch technische Regler ersetzt werden. Wie schwierig das ist, zeigen die Versuche mit vollautomatisierten Ackerschleppern [18]. Um diesen Schritt tun zu können, fehlen vor allem geeignete Meß- und Regelsysteme. Im Institut für landtechnische Grundlagenforschung laufen deshalb zur Zeit Forschungsarbeiten, um diese Lücke zu schließen und um zunächst wenigstens eine Teilautomatisierung der Regelfunktionen des Menschen zu ermöglichen.

## Schrifttum

Bei der Zusammenstellung des Schrifttums war die Dokumentationsstelle Landtechnik der FAL Braunschweig-Völkenrode behilflich.

- [1] *Schmidlein, H.*: Über den Wissensstand auf dem Forschungsgebiet „Regler“ Mensch. Jb. 1963 d. Wiss. Ges. f. Luft- und Raumfahrt, S. 484/99.
- [2] *Morgan, C. T., J. S. Cook; Chapanis und M. W. Lund*: Human engineering guide to equipment design. New York: McGraw-Hill 1963.
- [3] *Birmingham, H. P. und F. V. Taylor*: A design philosophy for man-machine control systems. Proc. IRE **42** (1954), S. 1748/58.
- [4] *Effertz, F. H. und F. Kolberg*: Einführung in die Dynamik selbsttätiger Regelungssysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag 1963.
- [5] *McRuer, D. T. und E. S. Krendel*: The human operator as a servo system element. J. Franklin Inst. **267** (1959), S. 381/403 und S. 511/36.
- [6] *North, J. D.*: The human transfer function in servo systems. Automatic and manual control. New York: Academic Press Inc. 1952, S. 473/501.

- [7] *Trustin, A.*: The nature of the operator's response in manual control, and its implications for controller-design. J. Inst. Electrical Engrs. **94**, Part II A (1947), S. 190/202.
- [8] *Küpfmüller, K.*: Informationsverarbeitung durch den Menschen. Nachricht.-techn. Z. (1959) H. 2, S. 68/74.
- [9] *Bekey, G. A.*: Discrete models of the human operator in a control system. Automatic and remote control (Applications and Components) 2<sup>nd</sup> Congress of the Int. Fed. Autom. Control Basel 1963, S. 430/38.
- [10] *Kersting, E.*: Über die Ein-Mann-Arbeit bei der Schlepperlängshacke in Rüben. Landtechn. Forsch. **15** (1965) H. 6, S. 178/82.
- [11] *Schünke, U.*: Fahrgeschwindigkeit und Beanspruchung des Menschen bei Ein- und Zweimannarbeit mit Schlepperanbaugeräten. Grundl. Landtechn. Heft 19 (1964), S. 11/18.
- [12] *Heller, C.*: Sichtbare Verluste in der Zuckerrübenerte durch die Rodeorgane. Landtechn. Forsch. **10** (1960) H. 5, S. 117/21.
- [13] *Wolfe, J. S.; F. K. Daynes und D. A. Bull*: Tractor steering in rowcrop cultivations. J. Agric. Engng. Res. **5** (1960) Nr. 2, S. 141/52; Nr. 3, S. 316/35 und Nr. 4, S. 406/17.
- [14] *Bronstein, Ja. L.*: Statistische Analyse der Arbeit einer automatischen Steuerung von Schleppern. Mechanizacija i Elektrifikacija **22** (1964) H. 2, S. 14/19, russ.
- [15] *Zimdahl, W.*: Führungsverhalten des vierrädrigen Straßenzugfahrzeugs bei Regelung des Kurses auf festgelegter Bahn. Regelungstechn. **13** (1965) H. 5, S. 221/26.
- [16] *Lehmann, A. und F. Stier*: Mensch und Gerät. Handbuch der Arbeitsmedizin I. Berlin, Wien, München: Verlag Urban und Schwarzenberg 1961, S. 718/87.
- [17] *Fiala, E.*: Lenken von Kraftfahrzeugen als kybernetische Aufgabe. Automob.-techn. Z. **68** (1966) Nr. 5, S. 156/62.
- [18] *Gilmour, W. D.*: An automatic control system for farm tractors. J. Agric. Engng. Res. **5** (1960) Nr. 4, S. 418/32.

DK 631.364.5:633.004.12/635.004.12

# Über den Verdichtungs Vorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern und die dabei auftretende Wandreibung

Von **Hans Otto Sacht**, Braunschweig<sup>1)</sup>

*Es wird über neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Verdichtung von Halmgut anhand experimenteller und theoretischer Untersuchungen berichtet. Behandelt wurde der Druckbereich der Ballen- und der Brikettierpressen, der sich von etwa 1 kp/cm<sup>2</sup> bis über 1000 kp/cm<sup>2</sup> erstreckt. Aufgezeigt werden die Zusammenhänge zwischen aufgewendetem Preßdruck, erreichbarer Dichte des Halmgutes sowie der Verdichtungsarbeit. Der Seitendruck und das Reibungsverhalten des verdichteten Halmgutes beim Gleiten an einer Stahlwand werden unter besonderer Berücksichtigung des bedeutenden Einflusses der Halmgutfeuchte untersucht.*

Die Halmgutbergung nimmt in der Landwirtschaft einen bedeutenden Platz ein. In den immer nur kurzen Erntezzeiten müssen große Heu-, Stroh- und Grüngutmassen, die zumeist außerordentlich voluminös anfallen, verarbeitet und geborgen werden. Dabei werden in erheblichem Maße Maschinen eingesetzt, die die notwendigen Arbeitsgänge verrichten, wie Feldhäcksler, Ladewagen, Ballenpressen und in Zukunft vielleicht auch Brikettierpressen. Bei einigen dieser Halmgut-

erntemaschinen treten neben den Aufnahme-, Arbeits- und Fördervorgängen Verdichtungs- und Reibungsvorgänge auf, die die Leistungsfähigkeit der Maschinen, die erzielte Arbeitsqualität sowie die Betriebssicherheit beeinflussen und daher für die Konstruktion und Entwicklung dieser Maschinen in vielen Fällen von grundlegender Bedeutung sind. Im folgenden werden neuere Ergebnisse und Erkenntnisse über das Verhalten des Halmgutes beim Verdichtungs- und Reibungsvorgang aufgrund experimenteller und theoretischer Untersuchungen wieder gegeben.

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen dem aufgewendeten Preßdruck und der damit erreichbaren Dichte behandelt. In enger Verbindung hiermit steht der zweite Punkt, die Verdichtungsarbeit. Um den bei einer Halmgutverdichtung auftretenden Seitendruck abschätzen zu können, werden anschließend gemessene Querdrukkzahlen angegeben. An letzter Stelle werden dann die Eigenschaften des Halmgutes beim Reiben auf einer Stahlwand erörtert.

## Preßdruck und Preßdichte

Stellt man sich in einem Preßtopf eine bestimmte Halmgutmenge vor, die durch einen Kolben langsam zusammengedrückt wird, so steigt die Dichte des Materials wegen des kleiner werdenden Volumens an. Der aufzuwendende Kolbendruck nimmt mit steigender Dichte progressiv zu. Wird Preßgut mit verschiedenen Feuchtegehalten verdichtet, so ergeben sich unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten zwischen dem Kolbendruck und

<sup>1)</sup> Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 25. Oktober 1966.

*Dr.-Ing. Hans Otto Sacht ist Konstrukteur in der Firma Gebr. Welger, Wolfenbüttel. Die vorstehende Arbeit ist während seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H. J. Matthies) der Technischen Hochschule Braunschweig entstanden.*