

2. Jahrgang

# TAGUNGSBERICHTE

13. RAKETEN - UND RAUMFAHRTTAGUNG  
vom 25. - 28. Juni 1964 in Darmstadt



## HERMANN OBERTH-GESELLSCHAFT

GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ERFORSCHUNG UND ERSCHLIESSUNG DES WELTRAUMS E. V.

(VORMALS: DEUTSCHE RAKETEN - GESELLSCHAFT [DRG.] E. V.)

Herausgegeben von Präsident A. F. Staats

29.

Dipl.-Ing. D.L. Teuber

"Nachbildung der Saturn V-Rakete  
auf elektronischen Analogrechnern"

EBs - DRUCK UND VERLAG HANNOVER

# HERMANN OBERTH-GESELLSCHAFT

Gesellschaft zur Förderung der Erforschung und  
Erschließung des Weltraums e.V.  
(vormals: Deutsche Raketen-Gesellschaft (DRG.) e.V.)

## TAGUNGSBERICHTE

Herausgegeben von Präsident A. F. Staats

29.

Dipl.-Ing. D.L. Teuber

"Nachbildung der Saturn V-Rakete  
auf elektronischen Analogrechnern"

---

Copyright by Hermann Oberth-Society  
Printed in Germany  
Nachdruck - auch auszugsweise -  
nur mit Genehmigung des Referenten gestattet.  
EBÖ-Druck u. Verlag der Hermann Oberth-Gesellschaft  
Hannover

### Zusammenfassung

Die Entwicklung grosser Raumfahrzeuge der Saturn V-Klasse stoesst auf zahlreiche Probleme, die bei der Entwicklung kleiner Raketen nicht auftreten. Die Zunahme im Aufwand einer Untersuchung wird offensichtlich, wenn Einflüsse atmosphaerischer Stoerungen auf nicht-lineare Regelvorgaenge waehrend der Antriebsphase der untersten Stufe des Raumfahrzeuges vorausberechnet werden sollen. Wegen der Unsicherheit in der Voraussage atmosphaerischer Stoerungen muessen Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung benutzt werden. Der Hochgeschwindigkeits-Analogrechner GPS im Repetierbetrieb ist fuer eine statistische Untersuchung besonders geeignet, da tausende von Loesungen fuer das Gesamtverhalten der Saturn V ausgewertet werden koennen.

Es werden die Systeme von Differentialgleichungen angegeben, die das Verhalten der Saturn V beschreiben. Bei Beruecksichtigung von Brennstoffschwappen und Biegeschwingungen wird auf dem Analogrechner ein System mit 12 Freiheitsgraden nachgebildet. Regellose Eingangsgroesse fuer die nachgebildeten Gleichungen ist die Windgeschwindigkeit als Funktion der Flugzeit. Dafuer werden Magnetbaender benutzt, auf denen gemessene Winde mehrerer Jahre gespeichert sind.

Nach einem anderen Verfahren wird die regellose Eingangsgroesse mittels Rauschgenerator und geeigneten zeitlich veraenderlichen Formfiltern hergestellt. Grundlage hierfuer sind Intensitaet und Leistungsspektrum der Windprofile. Ueberschreitungen vorher festgelegter Hoechstwerte, wie z. B. von Biegemoment, Maschinenauslenkung oder Anstellwinkel, werden vom Analogrechner registriert, wodurch sich eine Optimierung durch Veraenderung von frei wahlbaren Regelgroessen durchfuehren laesst.

Grundsaeztliche Verfahren zur Programmierung auf dem Analogrechner werden beschrieben und typische Regelvorgaenge der Saturn V wiedergegeben.

1. E
2. D
3. Z
4. R
5. T
6. Z
7. S

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung.....	1
2. Der elektronische Analogrechner GPS.....	2
3. Zur Programmierung.....	5
4. Regellose Eingangsgroessen .....	12
5. Typische Loesungen fuer die Saturn V.....	17
6. Zusammenarbeit verschiedener Gruppen.....	19
7. Schlussbemerkung.....	22
Literatur	
Bildunterschriften	

## 1. Einleitung

Die Groesse von Raumfahrzeugen der Saturn V-Klasse bringt einen erheblichen Aufwand in der Vorausberechnung des Flug-Verhaltens mit sich. Probleme, die zum Beispiel von Brennstoffschwappen und Biegeschwingungen herruehren, spielen eine entscheidende Rolle fuer die Auslegung des Kontrollsystems. Fuer die Vielzahl von Berechnungen erweist sich der Analogrechner als ein unentbehrliches Hilfsmittel. Denn einerseits werden die Probleme der Flugstabilitaet mathematisch durch Systeme gewoehnlicher linearer und nichtlinearer Differentialgleichungen beschrieben, und durch die erforderlichen Integrationen und Differentiationen koennen die Vorteile des Analogrechners ausgenutzt werden. Andererseits ist die begrenzte Genauigkeit des Analogrechners fuer eine ingenieurmaessige Behandlung der dynamischen Systeme grosser Raumfahrzeuge hinreichend. Ziel der Nachbildung der Saturn V (Bild 1) auf dem Analogrechner ist, rasch einen Einblick in die zeitlichen Vorgaenge waehrend des Fluges zu erhalten und den Einfluss von Parameteraenderungen abzuschuetzen. Diese Untersuchungen werden auf dem Digitalrechner durch groessere Genauigkeit ergaenzt, wenn einmal der Problem-bereich abgegrenzt ist.

Eine besondere Bedeutung aber bekommt der Analogrechner bei der Untersuchung regelloser Eingangsgrossen, die auf das Raumfahrzeug wirken. Hierzu gehoeren schwankende aerodynamische Belastungen auf dem Starttisch, atmosphaerische Turbulenzen und deren Einfluss auf Biegebeanspruchungen sowie Turbulenzen und Diffusionsvorgaenge in Grenzschichten waehrend des Fluges. Allen diesen Vorgaengen sind Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung gemeinsam und die Auswertung einer grossen Zahl von Daten.

In einer Veroeffentlichung von Rheinfurth (6) wurden theoretische Grundlagen fuer eine mathematische Analyse von linearen Systemen bei stochastischen Eingangsgrossen im Hinblick auf das Verhalten von Raumfahrzeugen in atmosphaerischer Turbulenz behandelt. Es soll im Folgenden ein Einblick vermittelt werden in die praktische Durchfuehrung einer statistischen Auswertung atmosphaerischer Stoerungen waehrend des Fluges der Saturn V.

## 2. Der Analogrechner GPS

Der Analogrechner GPS (hergestellt von der GPS Instrument Co. in Massachusetts, GPS ist die Abkuerzung fuer "General Purpose Simulator") ist fuer die Aufgabe ausgelegt, tausende von Loesungen fuer das Gesamtverhalten der Saturn V in kurzer Zeit zu liefern. Durch eine Zeittransformation laufen die Vorgaenge auf dem Analogrechner 3000 mal

schneller als in Wirklichkeit ab. Das heisst, dass bei dem Integrationsfaktor von  $3000 \text{ sec}^{-1}$  und 50 Volt Hoechstspannung der Verstaerker bei repetierendem Rechnen die Zeitspanne fuer einen Repetiertakt nicht 150 m sec ueberschreiten darf. Fuer den Flug der Saturn V-Rakete vom Start bis zum Brennschluss der S-IC-Stufe koennen auf diese Weise im Repetierbetrieb je Sekunde bis zu 50 Loesungen erhalten werden. Wegen der hohen Rechengeschwindigkeit haben die Rechenverstaerker eine Bandbreite von 1 MHz, und die Phasenverschiebung im Arbeitsbereich zwischen 0 und 20 kHz ist weniger als  $1^\circ$ .

Ein Vorteil des repetierenden Rechnens ist, dass die Loesungskurven in ihrem gesamten Verlauf sofort sichtbar sind. So laesst sich eine Variation von Parameterwerten bei Optimierungsaufgaben sofort in ihren Auswirkungen erkennen.

Bild 2 zeigt die gesamte Rechenanlage. An wichtigsten Rechenelementen enthaelt sie rund 50 Integrierer, 50 Summierer, 350 Potentiometer, 20 Parabel-Multiplizierer und 15 Funktionsgeber mit 70 Rechenverstaerkern. Zeitlich veraenderliche Groessen, wie z.B. aerodynamische Werte oder stochastische Funktionen, koennen von 2 Magnetbaendern mit je 7 Spuren bei einer Bandgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ Meter sec}^{-1}$  in den Analogrechner synchron mit den Rechenvorgaengen eingegeben werden. Umgekehrt lassen sich auch Loesungsfunktionen auf den Magnetbaendern speichern. Nach

einer Analog-Digital-Umsetzung koennen die Loesungsfunktionen in einem Digitalrechner fuer weitere Rechenoperationen benutzt werden.

Fuer statistische Untersuchungen enthaelt die Anlage weiterhin Rauschgeneratoren, Schalter, Komparatoren, Wahrscheinlichkeitsverteilungs-Analysatoren, einstellbare Hoch- und Tiefpaesse und Zaehler. Bilder 3 und 4 zeigen Ausschnitte aus der Anlage. Als Ausgabegeraet dienen neben den Magnetbaendern entweder 40 cm-Oszillografen oder die Loesungen koennen auf einem gewoehnlichen Oszillografen fotografiert werden. Weiterhin kann ein Schleifenzillograf vom Typ Honeywell "Visicorder" mit einer Papiergeschwindigkeit von maximal  $2 \text{ Meter sec}^{-1}$  benutzt werden.

Der Rechnungsablauf sowie die Eingabe- und Ausgabegeraete werden zentral von einem Generator her gesteuert. Von ihm kommen alle synchronisierenden Signale, die fuer den Betrieb der Anlage noetig sind.

Es ist im Rahmen dieser Darstellung nicht moeglich, die nachzubildenden Systemgleichungen der Saturn V-Rakete abzuleiten und eine Nachbildung auf dem Analogrechner in Einzelheiten zu beschreiben. Es sollen vielmehr grundsaeztliche Methoden fuer die Nachbildung der Saturn V hervorgehoben werden, wie sie auf einem Analogrechner auch in "Echtzeit" durchgefuehrt werden koennte (d.h. Maschinenzeit und

Problemzeit sind identisch). Der Analogrechner GPS im Repetierbetrieb wird hervorgehoben im Hinblick auf die Moeglichkeiten, die damit fuer eine statistische Untersuchung gegeben sind.

### 3. Zur Programmierung

In der einfachsten Form wird das Verhalten der nachzubildenden Saturn V durch vier lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten beschrieben (2). Es wird dabei angenommen, dass die Lageregelung in drei aufeinander senkrecht stehenden Achsen unabhengig voneinander erfolgt, dass keine elastischen Deformationen der Saturn V oder Fluessigkeitsschwingungen in den Treibstoffbehaeltern auftreten und dass alle Nichtlinearitaeten vernachlaessigt werden koennen. Von dem Gleichgewicht aller Kraefte laesst sich ableiten:

$$\ddot{z} = k_1\phi + k_2\alpha + k_3\beta$$

Aus dem Gleichgewicht der Momente folgt:

$$\ddot{\phi} + c_1\alpha + c_2\beta = 0$$

Es besteht fuer die Winkel die Beziehung:

$$\alpha = \phi - \frac{l}{v}\dot{z} + \frac{v_w}{v}$$

Fuer die Regelung gilt:

$$\beta = a_0\phi + a_1\dot{\phi} + b_0\alpha$$

Es bedeuten:

- Z Seitenabweichung (bezogen auf raumfestes Referenzsystem)
- $\phi$  Winkelauslenkung
- $\alpha$  Anstellwinkel
- $\alpha_w$  Winkel fuer Windangriff
- $\beta$  Triebwerkauslenkung
- V Geschwindigkeitsvektor der Rakete
- $C_1$  aerodynamischer Koeffizient
- $C_2$  aerodynamischer Koeffizient
- $k_1 k_2 k_3$  Koeffizienten fuer das Gleichgewicht aller Kraefte
- $a_0 a_1 b_0$  Verstaerkungen

Zwei der Wurzeln der charakteristischen Gleichung dritter Ordnung koennen der schnellen Schwingung der Rakete um ihren Schwerpunkt zugeordnet werden. Mit guter Naehrerung werden die Schwingungen durch ein System zweiter Ordnung beschrieben mit

$$\omega_c = \sqrt{c_1 + c_2 (a_0 + b_0)}$$

und

$$2\omega_c \zeta = a_1 c_2$$

Fuer die Saturn V liegt die Kontrollfrequenz bei 0.2 Hz und einer Daempfung von 70% der kritischen. Beide Groessen werden durch

Veraenderung von  $a_0, b_0, a_1$  waehrend der Flugzeit praktisch konstant gehalten.

Neun der Koeffizienten aendern sich waehrend der Flugzeit.

Diese sind  $k_1, k_2, k_3, v, c_1, c_2, a_0, a_1, b_0$

Typische Werte fuer die zeitlich veraenderlichen Koeffizienten sind auf Bild 5 gezeigt. Eingangsgroesse fuer die Gleichungen ist die Windgeschwindigkeit  $V_w$  in Abhaengigkeit von der Flugzeit. Negative Werte von  $C_1$  zeigen an, dass der Schwerpunkt der Rakete hinter dem Angriffspunkt der aerodynamischen Kraefte liegt und so der Flug der unregelten Rakete unstabil waere.

Nach einem Vorschlag von Horn (4) ist es zweckmaessig, einige der Veraenderlichen zusammenzufassen in

$$\rho = (c_1 + c_2 b_0) / \omega_c^2$$

Vorteile dieser Darstellung liegen zunaechst in der Anschaulichkeit der Ergebnisse, wenn der Einfluss von Parameterveraenderungen auf Uebergangsvorgaenge untersucht werden soll. Bild 6 zeigt das Signalflussbild mit Einschluss des Frequenzganges  $F_A$  der Stellglieder der Raketenmotore. Es laesst sich aus den auf Seite 5 angegebenen Grundgleichungen herleiten.

Die Darstellung fuer den Analogrechner zeigt, wie die zunaechst als konstant angenommenen Parameter verschiedenen Potentiometern

FHS



SPECIAL-POST

zugeordnet sind und sich so zum Beispiel das Biegemoment  $M_T$  an einer bestimmten Stelle der Saturn V in Abhängigkeit von der Flugzeit und in Abhängigkeit von Änderungen der Parameter messen lässt.

Ein weiterer Vorteil der Zusammenfassung aerodynamischer und regelungstechnischer Daten in  $\omega_c$  und  $\rho, \xi$  ist der, dass damit Multiplizierer auf dem Analogrechner eingespart werden können. Die zeitlich veränderlichen Parameter sind auf Bild 7 gezeigt. Im Vergleich zu Bild 5 sind es nun 6 Veränderliche und damit 6 Multiplizierer, die bei der Nachbildung auf dem Analogrechner zu berücksichtigen sind. Eine Approximation der Funktionen durch Diodenfunktionsgeber ist mit hinreichender Genauigkeit möglich.

Die Prinzipschaltung für eine Nachbildung auf elektronischen Analogrechnern zeigt Bild 8. Es ist die Erweiterung der Schaltung von Bild 6 auf zeitlich veränderliche Koeffizienten. In dieser einfachen Form entspricht die Analogie einem linearen dynamischen System mit zeitlich veränderlichen Koeffizienten. Das Prinzip der Überlagerung gilt auch für Systeme dieser Art, jedoch hängt das Übergangsverhalten im Gegensatz zu einem solchen mit konstanten Koeffizienten von dem Augenblick ab, zu dem die Eingangsgroesse eingegeben wird. In (3) wird darauf hingewiesen, dass die Analyse und Synthese solcher Systeme, die durch lineare Differentialgleichungen mit veränderlichen Koeffizienten beschrieben werden,

unzufried  
als ein a  
schrieber  
Die  
allgemein  
rechner.  
schwingu  
systeme  
gungsm  
oder Ans  
zu einem  
Saturn V  
werden e  
dieser D  
beschrei  
grundsae  
rechner  
ein Syste  
werden v

[M

unzufriedenstellend vom Standpunkt des Regeltechnikers sind. Es wird als ein aussichtsreiches Gebiet fuer weitere Forschungsaufgaben beschrieben.

Die Schaltung auf Bild 8 ist lediglich der Ausgangspunkt fuer eine allgemeine Nachbildung der Saturn V auf dem elektronischen Analogrechner. Bei Beruecksichtigung von Treibstoffschwingungen, Biegeschwingungen, Frequenzgaengen von Uebertragungselementen der Regelsysteme in der Rakete (wie z.B. Anstellwinkelmesser oder Beschleunigungsmesser) oder von Nichtlinearitaeten wie Saettigungen, Begrenzungen oder Ansprechempfindlichkeiten waechst die Darstellung auf Bild 8 rasch zu einem komplexen System. Fuer die vollstaendige Nachbildung der Saturn V auf einem Analogrechner, wie auf dem zuvor beschriebenen GPS, werden einige hundert Rechenelemente verschaltet. Es ist im Rahmen dieser Darstellung nicht moeglich, Einzelheiten der Analogschaltung zu beschreiben. Mit der Kurzschrift der Mathematik lassen sich aber einige grundsaeztliche Verfahren fuer die Programmierung auf dem Analogrechner hervorheben. Die Bewegungsgleichungen der Rakete koennen als ein System von linearen DGL. mit variablen Koeffizienten dargestellt werden von der Form

$$[M(t)]\ddot{x} + [C(t)]\dot{x} + [K(t)]x = \{q(t)\}$$

mit

$$[M(t)] = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad \ddot{x} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{pmatrix}$$

Dabei sind  $M(t)$ ,  $C(t)$ ,  $K(t)$  die zeitabhaengigen Massen-,  
Daempfung- und Federmatrix des Systems,  $(X)$  der Zustandsvektor und  
 $q(t)$  die generalisierten Kraefte.

Die Bewegungsgleichungen sind noch durch das Kontrollgesetz zu  
ergaenzen, wodurch die Triebwerksauslenkung mit dem Zustandsvektor  
verknuepft wird.

In den Ausgangsgleichungen fuer die Programmierung erscheinen  
die zweiten Ableitungen einiger Veraenderliche in den Gleichungen fuer  
die zweiten Ableitungen anderer Veraenderlicher. Grundsaeztlich  
koennen bei der direkten Nachbildung der Ausgangsgleichungen auf dem  
Analogrechner Schwierigkeiten entstehen durch geschlossene algebraische  
Schleifen. Solche Schaltungs-Schleifen enthalten nur Summierer und  
neigen bei bestimmten Werten der Schleifenverstaerkung wegen der nicht-  
idealen Eigenschaften der Rechenverstaerker zur Instabilitaet. Diese  
Schwierigkeit wurde zunaechst durch geeignete Eliminationen in den Aus-  
gangsgleichungen umgangen. Eine digitale Matrixtransformation ergibt:

$$\ddot{x} = -[M(t)]^{-1} [C(t)] \dot{x} - [M(t)]^{-1} [K(t)] x + [M(t)]^{-1} \{q(t)\}$$

Damit erhaelt man Gleichungen, von denen jede hoechstens eine zweite Ableitung enthaelt. Bild 9 zeigt die Nachbildung einer der 12 aus dieser Elimination zweiter Ableitungen hervorgehenden Differentialgleichungen. Insgesamt werden fuer die vollstaendige Nachbildung rund 300 Potentiometer fuer die Koeffizienten gebraucht, die als konstant angenommen werden koennen. Alle 20 Multiplizierer bilden die wichtigsten zeitlich veraenderlichen Koeffizienten nach.

Ein Nachteil der Elimination zweiter Ableitungen mit Hilfe der Matrizen-Transformation ist, dass damit neue Koeffizienten gebildet werden, die im allgemeinen Summen und Produkte aus denen der Ausgangsgleichungen sind. Damit geht fuer die Analognachbildung die Anschaulichkeit der Koeffizienten der Ausgangsgleichungen verloren. Bei diesen kommt jedem der Koeffizienten eine bestimmte praktische Bedeutung fuer die Auslegung der Rakete zu, wie zum Beispiel Schubkraft, Masse oder aerodynamische Kraft. Die Zahlenwerte hierfuer sind auf dem Analogrechner bestimmten Potentiometern oder Funktionsgebern zugeordnet. Aus diesem Grunde, der bei Aenderungen von Parametern von Bedeutung ist, wurde auch eine direkte Nachbildung der Ausgangsgleichungen der Saturn V auf dem Analogrechner GPS durchgefuehrt durch schrittweise Erweiterung der Schaltung nach Bild 7. Es wurden unter anderem hinzugefuegt: 4 elastische Biegelinien, 3 lineare

Schwingermodelle zur Beschreibung der Treibstoffschwingungen in den Boostertanks sowie die Frequenzgaenge verschiedener Uebertragungselemente. Dabei traten keine Stabilitaetsschwierigkeiten in der Rechenschaltung auf, wenn die Koeffizienten nicht zu weit von den "Nennwerten" der Saturn V veraendert werden. Bei Veraenderung von Parametern in weiten Grenzen fuer allgemeine Studien an grossen Raumfahrzeugen jedoch laesst sich die Stabilitaet der Rechenschaltung nur durch die beschriebene Elimination geschlossener algebraischer Schleifen auf Kosten der Anschaulichkeit der Nachbildung gewaehrleisten.

#### 4. Regellose Eingangsgroessen

Die Nachbildung der dynamischen Vorgaenge, wie sie waehrend des Fluges der Saturn V auftreten, durch elektrische Schaltungen mit einem Analogrechner erfolgt am G. C. Marshall Space Flight Center zu verschiedenen Zwecken und an verschiedenen Anlagen. Der Umfang der Nachbildung ist durch die Groesse der Anlage, das heisst durch die Anzahl der gegebenen Recheneinheiten festgelegt. Bei einer Nachbildung im Echtzeitbetrieb, wie zum Beispiel im Astrionik Labor, werden Flugkomponenten wie Verstaerker, Filter oder hydraulische Anlagen der Rakete in die Nachbildung mit einbezogen. Fuer die Untersuchung von selbstanpassenden Regelungen benutzt das Computation Labor gemischte

Analog-  
die bis  
gaenge  
fuer de  
E  
Nachbil  
E  
atmosph  
Stoerun  
eine B  
durchs  
tions-  
versag  
einer t  
logrec  
liche S  
nichtli  
gangs  
groes  
denen

Analog-Digital-Rechner. Grundlage fuer alle diese Nachbildungen sind die bisher behandelten Differentialgleichungen, die die dynamischen Vorgaenge mathematisch beschreiben, und die Verfahren der Programmierung fuer den Aufbau der elektrischen Schaltungen.

Es seien nun die Besonderheiten des Analogrechners GPS fuer eine Nachbildung der Saturn V im Aero-Astrodynamic Labor hervorgehoben.

Beim Aufstieg durch die Atmosphaere wird die Saturn V starken atmosphaerischen Stoerungen ausgesetzt. Von Natur aus sind diese Stoerungen im einzelnen regellos. Die mathematische Statistik erlaubt eine Beschreibung der Vorgaenge mit Hilfe von Amplitudenquadraten und durchschnittlicher Zahl von Ueberschreitungen, mit Hilfe von Korrelations- und Leistungsdichtefunktionen (7,1). Systemtheoretische Methoden versagen aber bei der Analyse eines nichtlinearen Systems, wie es bei einer tiefergehenden Untersuchung der Saturn V vorliegt. Auf dem Analogrechner jedoch ist eine Behandlung dieser Systeme ohne grundsatzliche Schwierigkeiten moeglich. Es ist aber nun notwendig, nicht nur die nichtlinearen Differentialgleichungen sondern auch die regellosen Eingangsgroessen nachzubilden.

Zwei Wege werden in der Herstellung des Windes als regellose Eingangsgroesse begangen. Auf dem einen Weg werden Magnetbaender benutzt, auf denen tatsaechlich gemessene Winddaten bis zu einer Hoehe von 27 km

gespeichert sind. Die Winddaten wurden am Kap Kennedy durch Radar-  
vermessungen von Ballonaufstiegen erhalten. Die Daten sind statistisch  
ueber einen Zeitraum von 3 sec gemittelt. Bei einer Aufstieggeschwindig-  
keit des Ballons von  $8 \text{ m sec}^{-1}$  ergeben die Messungen die Windgeschwin-  
digkeiten fuer Hoehenintervalle von 25 Meter. Die hohe Rechengeschwin-  
digkeit des Analogrechners GPS erlaubt es, die taeglichen Messdaten  
mehrerer Jahre in wenigen Minuten als regellose Eingangsgroessen fuer  
die Nachbildung der Saturn V abzuspielen und statistisch auszuwerten.  
Auf diese Weise laesst sich das Verhalten der Saturn V bei atmosphaeri-  
schen Stoerungen messen. Den interessierenden Veraenderlichen, wie  
Triebwerksauslenkungen oder Anstellwinkel beim Flug der Saturn V, lassen  
sich auf dem Analogrechner Hoechstwerte zuordnen. Die Anzahl von Ueber-  
schreitungen dieser Hoechstwerte wird vom Rechner automatisch regi-  
striert und laesst sich zur Gesamtzahl der Windprofile in Beziehung setzen.

Von besonderer Bedeutung ist das wiederholte Abspielen eines be-  
stimmten Windprofils auf einem geschlossenen Magnetband. Durch Ver-  
aenderung frei waehlbarer Regelgroessen koennen bestimmte Optimierungs-  
verfahren angewendet werden mit dem Ziel, einen guten Kompromiss  
zwischen oft einander widersprechenden Entwurfskriterien zu erreichen.

Die Optimierung von Uebergangsvorgaengen fuer ein bestimmtes  
Windprofil bedeutet nicht notwendigerweise, dass damit das Verhalten der

Saturn V  
stellend  
Herstel  
schen C  
auf Bild  
generat  
tisch ko  
eine Ga  
Leistun  
rechens  
einen m  
Diese A  
und fuer  
anderen  
von eine  
werden  
Filter h  
entspre  
schnittl  
vorgege  
ist den

Saturn V fuer alle beim Startzeitpunkt wahrscheinlichen Winde zufriedenstellend sein wird. Deswegen wird gegenwaertig ein anderer Weg in der Herstellung des Windes als regellose Eingangsgroesse fuer die dynamischen Gleichungen der Saturn V begangen. Der Wind wird mit Hilfe der auf Bild 10 schematisch dargestellten Schaltung hergestellt. Ein Rauschgenerator liefert eine regellose, normalverteilte Zeitfunktion mit praktisch konstanter Leistungsdichte. Dieses weisse Rauschen wird durch eine Gaussverteilung beschrieben. Der Frequenzbereich, fuer den die Leistungsdichte konstant ist, ist groesser als die Bandbreite der Analogrechenschaltung. Der Wind wird nun in drei Anteile aufgespalten: in einen monatlichen Mittelwert, in Tagesschwankungen und in Turbulenz. Diese Aufteilung ist willkuerlich aber zweckmaessig fuer die Messtechnik und fuer eine Synthese, bei der sich jeder Anteil unabhaengig von den anderen veraendern laesst. Der monatliche Mittelwert wird mit Hilfe von einem Funktionsgeber erzeugt, Tagesschwankungen und Turbulenz werden aus dem weissen Rauschen mit Hilfe zeitlich veraenderlicher Filter herausgesiebt. Dabei wird die Bandbreite der Filter  $F_w$  und  $F_T$  entsprechend der Fluggeschwindigkeit der Rakete erweitert. Die durchschnittliche Zahl von Nulldurchgaengen, Verteilung und Ueberschreitung vorgegebener Werte pro Zeiteinheit in Tagesschwankungen und Turbulenz ist den Filterparametern  $\Omega$  und  $\zeta$  zugeordnet (5).

Der Hauptzweck dieser statistischen Analyse ist dreifach. Zunaechst soll eine statistische Beschreibung gemessener Winde im Hinblick auf die Untersuchung der dynamischen Vorgaenge beim Fluge der Saturn V durchgefuehrt werden. Hierfuer ist die Nachbildung des Windes mit elektronischen Schaltungen ein wesentliches Hilfsmittel.

Weiterhin koennen nichtlineare Systeme, wie die Differentialgleichungen der Saturn V, nicht mit analytischen Methoden untersucht werden. Rauschgeneratoren und Analogrechner sind unentbehrliche Hilfsmittel fuer eine realistische Untersuchung dieser Systeme. Drittens soll der Einfluss von Parameterraenderungen auf die Uebergangsvorgaenge der Saturn V bei regellosen Eingangsgroessen untersucht werden.

Fuer alle diese statistischen Untersuchungen wird eine grosse Zahl von Loesungen benoetigt, die der Rechner GPS in kurzer Zeit liefern kann. Eine Auswertung dieser Loesungen wird durch einen elektronischen Korrelator ausgefuehrt. Dabei wird als Laufzeitgeraet ein Magnetbandgeraet benutzt. Mit Hilfe von Korrelationsfunktionen wird der Zusammenhang zum Beispiel von gemessenen und "synthetischen" Winden, von Belastungen und Auslenkungen waehrend des Fluges mit atmosphaerischen Stoerungen beschrieben. Diese Untersuchungen sind zur Zeit in vollem Gange.

Bild  
Ausschluss  
koennen.  
veraender  
fuer eine L  
in der Nae  
dann eine  
nommen in  
suchung d  
coefficient  
Fuer  
Windgesch  
keit in Ab  
der verae  
parameter  
ten Kurve  
Bild  
wurden ei  
dynamisch  
schwindig

### 5. Typische Loesungen fuer die Saturn V

Bild 11 zeigt den Verlauf typischer Windgeschwindigkeiten unter Ausschluss von Turbulenz, wie sie beim Fluge der Saturn V auftreten koennen. Fuer vereinfachte Analognachbildungen werden die zeitlich veraenderlichen Koeffizienten "eingefroren". Die Untersuchung ist dann fuer eine Flugdauer von wenigen Sekunden von Gueltigkeit, zum Beispiel in der Naehة maximalen Staudrucks bei der 80ten Flugsekunde. Es wird dann eine mittlere Fluggeschwindigkeit von ungefaehr  $500 \text{ m sec}^{-1}$  angenommen in einem Hoehenbereich zwischen 12 und 15 km. Fuer die Untersuchung der Vorgaenge um die 80te Flugsekunde wird der mit C (constant coefficients) bezeichnete Windverlauf benutzt.

Fuer zeitlich veraenderliche Koeffizienten wird aus den gemessenen Windgeschwindigkeiten in Abhaengigkeit der Hoehe die Windgeschwindigkeit in Abhaengigkeit von der Flugzeit gebildet unter Beruecksichtigung der veraenderlichen Fluggeschwindigkeit. Die mit TVP (time varying parameter) bezeichnete Kurve ist zur 80ten Sekunde der mit C bezeichneten Kurve gleich.

Bild 12 zeigt typische Uebergangsvorgaenge fuer die Saturn V. Es wurden einmal die zur 80ten Sekunde eingefrorenen Koeffizienten in den dynamischen Gleichungen fuer die auf Bild 11 mit C bezeichneten Windgeschwindigkeiten benutzt. Zum anderen wurden die auf Bild 7 dargestellten

zeitlich veraenderlichen Koeffizienten programmiert und die auf Bild 11 mit TVP bezeichneten Windgeschwindigkeiten benutzt. Die Uebereinstimmung der entsprechenden Veraenderlichen zur 80ten Sekunde ist recht gut. Zu diesem Zeitpunkt ist die Veraenderung von Koeffizienten langsam im Vergleich zum Uebergangsverhalten und zu den Zeitkonstanten des gesamten Systems. Zu anderen Zeitpunkten aendern sich die Koeffizienten so rasch, dass sie fuer die Aufnahme des Uebergangsverhaltens waehrend eines bestimmten Zeitraumes nicht mehr als eingefroren angenommen werden duerfen.

Als Beispiel fuer eine statistische Auswertung zeigt Bild 13 die durchschnittliche Zahl von Ueberschreitungen fuer verschiedene Werte im Biegemoment an einer bestimmten Stelle der Saturn V bei Anwendung zeitlich veraenderlicher Koeffizienten. Analytische Methoden versagen, wenn Nichtlinearitaeten im Regelkreis mit einbezogen sind. Die Analog-Untersuchung ist besonders wertvoll, da die interessierenden Verteilungsfunktionen fuer das Systemverhalten durch Messungen leicht erhalten werden koennen.

Fuer die Verteilungsfunktion auf Bild 13 wurden die gemessenen Winde der Monate Januar, Februar und Maerz des Jahres 1958 vom Kap Kennedy benutzt. Bei 2 Messungen taeglich liegen 180 Windprofile vor. Wegen der extrem kurzen Rechenzeit der einzelnen Rechenablaeufer auf

dem GPS i  
und eine A  
funktionen  
Analogrech  
schaltunge  
genommen

Auf  
lungen zus  
Nachbildung

sei diese V

Eine  
durchfuehr

notwendig

sungen mu

bekannt se

voraussetz

gen von B

haltens vo

Brauchbar

sungen, L

dem GPS ist der Zeitaufwand fuer die Messung einer solchen Kurve gering und eine Angelegenheit weniger Minuten. Es lassen sich die Verteilungsfunktionen fuer mehrere Veraenderliche gleichzeitig bestimmen. Auf dem Analogrechner GPS werden die Messungen mit Komparatoren und Zaehlschaltungen waehrend des Abspielens der Magnetbaender automatisch vorgenommen.

#### 6. Zusammenarbeit verschiedener Gruppen

Auf dem Analog-Rechner laufen die Konstruktionsdaten vieler Abteilungen zusammen. Rueckwirkend beeinflussen die Ergebnisse der Analog-Nachbildung die praktische Auslegung der Saturn V. An einigen Beispielen sei diese Wechselwirkung naeher beschrieben.

Eine gute Zusammenarbeit mit der Gruppe, die Windmessungen durchfuehrt, ist fuer eine erfolgreiche Durchfuehrung der Analogmessungen notwendig. Die Genauigkeit und das Aufloesungsvermoegen der Windmessungen muss fuer eine Fehleruntersuchung in den Analog-Untersuchungen bekannt sein, was wiederum eine genaue Kenntnis der Windmessverfahren voraussetzt. Es werden zur Zeit neben der Methode der Radarvermessungen von Ballonaufstiegen oder der optischen Vermessung des zeitlichen Verhaltens von Rauchsaeulen weitere Methoden der Windmessung auf ihre Brauchbarkeit untersucht. Hierfuer gehoeren Radar-Rueckstreuungsmessungen, Laser-Methoden u. a.

Selbstverstaendlich baut das Verfahren, Wind mit Hilfe elektronischer Schaltungen fuer Analog-Messungen herzustellen, auf den Windmessungen auf. Beide Methoden werden durch eine mathematische Beschreibung mit Hilfe der Statistik verbunden.

Eine Anzahl der zeitlich veraenderlichen Koeffizienten haben ihren Ursprung in der Aerodynamik des Raumfahrzeuges. Da die aerodynamischen Kraefte allgemein in sehr verwickelter Weise von der Machzahl, dem Anstellwinkel und der Konfiguration des Flugkoerpers abhaengen, werden diese durch Untersuchungen im Windkanal an Modellen ermittelt. Ihren Einfluss auf das dynamische Verhalten der Saturn V mit Einschluss eines Kontrollsystems zeigen die Analog-Untersuchungen.

In einem dynamischen Pruefstand wird die Saturn V aufgehaengt, um das elastische Verhalten der gesamten Struktur zu erhalten. Die Rakete wird am Aufhaengungspunkt der Triebwerke seitlich und in Laengsrichtung mit zeitlich sinusfoermig veraenderlichen Kraeften bewegt. Die Untersuchungen werden in drei aufeinander senkrecht stehenden Ebenen und mit verschiedenen nachgebildeten Treibstofflasten durchgefuehrt. Aus Messungen und Berechnungen entsteht eine Modellvorstellung ueber die Biegeschwingungen. Die Eigenschwingungen und Daempfung zur mathematischen Beschreibung dieser ausserordentlich wenig gedaempften Schwingungssysteme finden sich auf dem Analogrechner wieder.

In aehnlicher Weise werden Treibstoffschwingungen auf einem Pruefstand ermittelt. Auf dem Analogrechner werden die aus den Messungen bestimmten Daten benutzt, Voraussagen fuer das Verhalten dieser Treibstoffschwingungen im Zusammenspiel mit anderen dynamischen Vorgaengen zu treffen.

Weiterhin lassen sich auf dem Analogrechner leicht die Filter nachbilden, die einen bestimmten Frequenzgang fuer die Stabilisierung der geschlossenen Regelkreise der Saturn V haben muessen. Diese Untersuchungen auf dem Analogrechner wirken auf die praktische Auslegung des gesamten Kontrollsystems zurueck.

Eine enge Zusammenarbeit besteht besonders zwischen der Flugauswertung und den Analogmessungen. Fuer die Saturn V werden erst in der Zukunft die tatsaechlichen Flugdaten vorhanden sein. Die gegenwaertigen Analog-Untersuchungen bauen aber auf den bisherigen Flugdaten der Saturn I auf. Die gute Uebereinstimmung zwischen dem tatsaechlichen Flugverhalten und dem vom Analogrechner vorausgesagten Verhalten vergangener Fluege berechtigt zu grossem Vertrauen in die Verwirklichung der gegenwaertigen Voraussagen ueber die Saturn V am Analog-Modell.

### 7. Schlussbemerkung

Der Analogrechner ist als ein mathematisches Instrument ein Bindeglied zwischen Theorie und Praxis und ein unentbehrliches Hilfsmittel fuer die Nachbildung der Saturn V. Diese Nachbildung erweitert die Theorie, wie zum Beispiel bei dem Versuch einer mathematischen Beschreibung der Vorgaenge, die beim Einwirken regelloser Groessen auf Systeme gewoehnlicher nichtlinearer Differentialgleichungen mit variablen Koeffizienten auftreten. Wegen der hohen Rechengeschwindigkeit ist der Analogrechner GPS im Repetierbetrieb geeignet, die fuer ein tieferes Eindringen in die Theorie notwendige Auswertung sehr vieler Loesungen in kurzer Zeit zu liefern.

Fuer die Praxis erlaubt der Analogrechner rasch einen anschaulichen Einblick in die verwickelten Vorgaenge, die beim Zusammenwirken von Treibstoffschwingungen, Biegeschwingungen und Regelvorgaengen waehrend des Fluges der Saturn V auftreten koennen. Durch Parameterraenderungen und Optimierungsverfahren lassen sich die Entwurfskriterien finden, die einen erfolgreichen Start der Saturn V garantieren.

Literatur

1. Bieber, N. E., "Missile Structural Loads by Nonstationary Statistical Methods," Journal of the Aerospace Sciences, April 1961.
2. Geissler, E. D., "Problems in Attitude Stabilization of Large Guided Missiles," Aerospace Engineering, Vol. 19, No. 10, October 1960.
3. Gibson, Nonlinear Automatic Control, McGraw-Hill Book Company, 1963.
4. Horn, Teuber, "A General Analog Simulation of Large Space Vehicles," (in preparation, NASA Technical Note).
5. Rainal, A. J., "Zero-Crossing Intervals of Gaussian Processes," IRE Transactions on Information Theory, October 1962.
6. Rheinfurth, M., "Das Verhalten von Raumfahrzeugen in atmosphärischer Turbulenz," 12. Raketen- und Raumfahrttagung, 1963, Hamburg, Germany.
7. Wiener, Norbert, Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, John Wiley & Sons, New York, 1950.

Bildunterschriften

Fig. 1 Die Saturn V LOR Rakete

Fig. 2 Der Analog-Rechner GPS, Gesamtanlage

Fig. 3 Der Analog-Rechner GPS, Magnetbaender und statistische Recheneinheiten

Fig. 4 Der Analog-Rechner GPS, Kontrollpult und Recheneinheiten

Fig. 5 Zeitlich veraenderliche Parameter

Dimensionen:

$C_1$	in	$\text{sec}^{-2}$	$\frac{1}{V}$	in	$\left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)^{-1}$
$C_2$		$\text{sec}^{-2}$	$a_0$		dimensionslos
$k_1$		$\text{m sec}^{-2}$	$a_1$	in	$\text{sec}^{-1}$
$k_2$		$\text{m sec}^{-2}$	$b_0$		dimensionslos
$k_3$		$\text{m sec}^{-2}$			

Fig. 6 Signalflossbild und Diagramm fuer den Analogrechner bei konstanten Parametern

Fig. 7 Zusammenfassung einiger veraenderlicher Parameter (vgl. Fig. 5 fuer Dimensionen)

Fig. 8 Analogrechner Diagramm fuer zeitlich veraenderliche Parameter

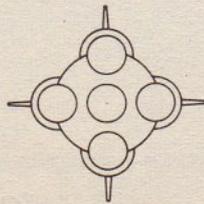
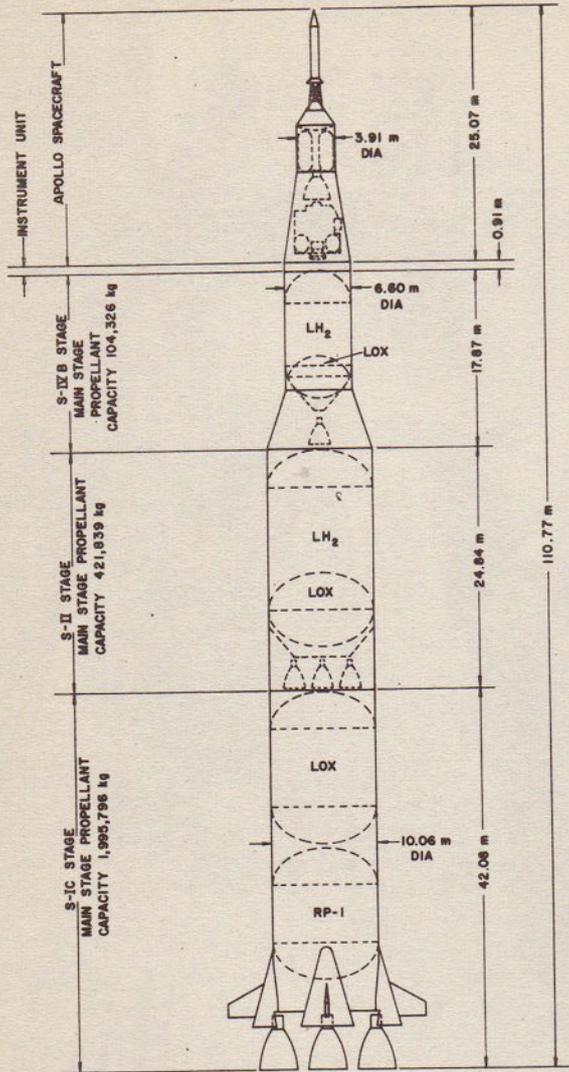
Fig. 9 Typische Nachbildung eines Systems zweiter Ordnung

Fig.10 Zur Nachbildung des Windes

Fig.11 Typische Windgeschwindigkeiten fuer konstante und veraenderliche Parameter

Fig.12 Typische Uebergangsvorgaenge der Saturn V bei konstanten und veraenderlichen Parametern

Fig.13 Eine Verteilungskurve



SATURN V VEHICLE

FIG. 1

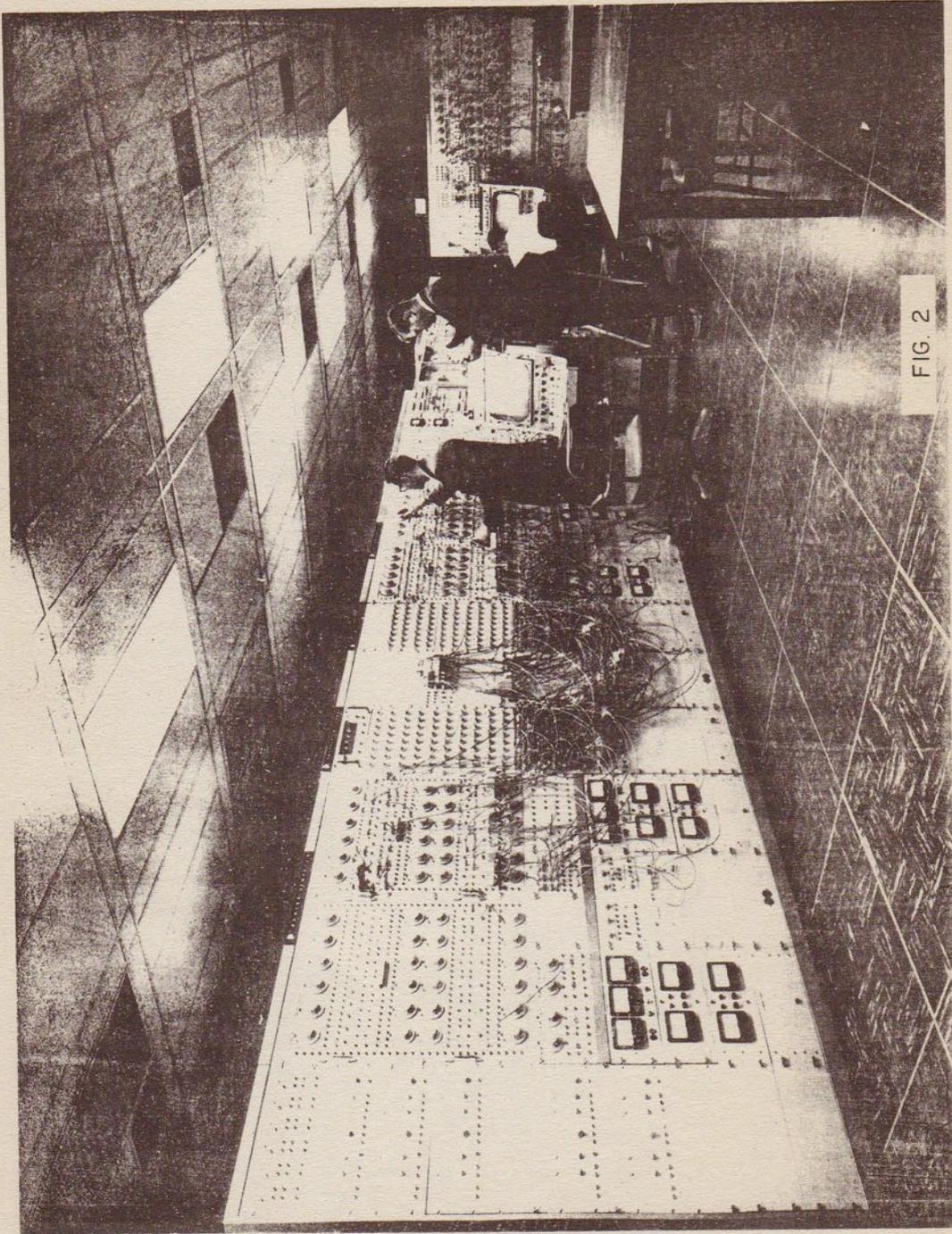


FIG. 2

FHS

SPECIAL-POST



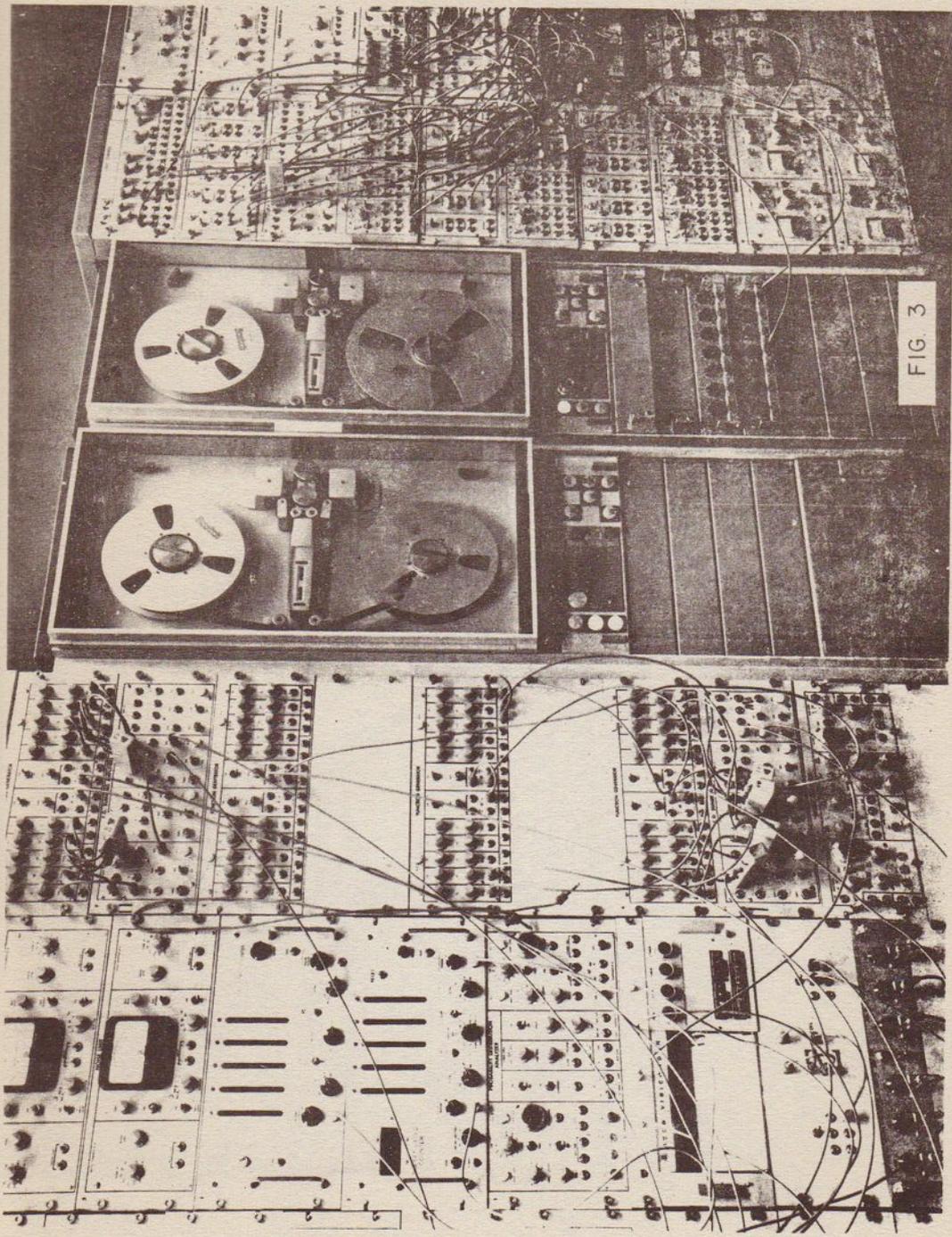


FIG. 3

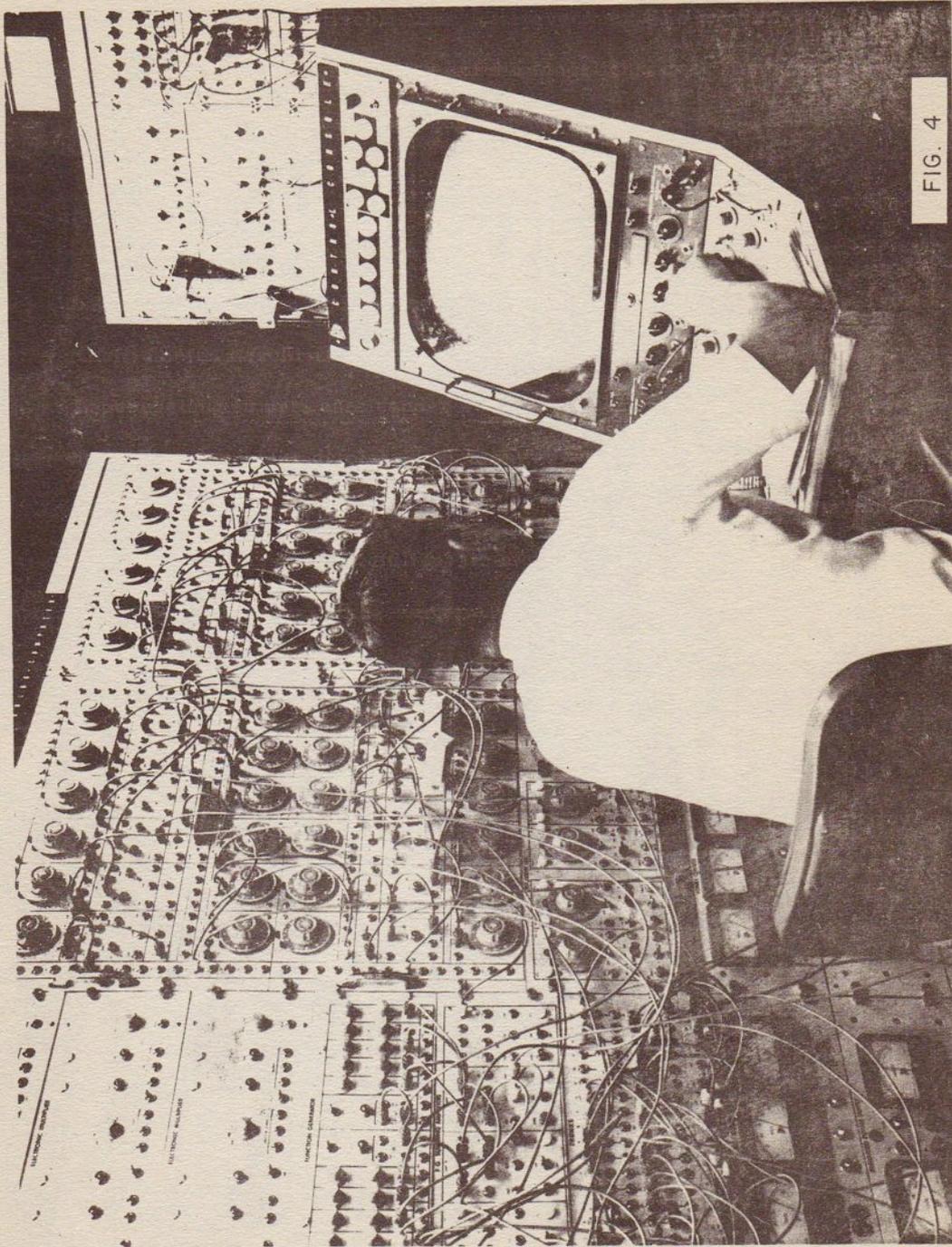
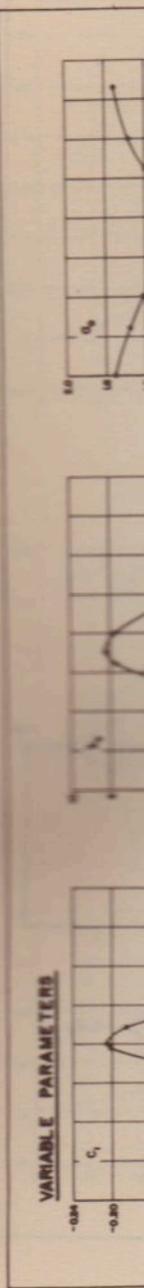


FIG. 4



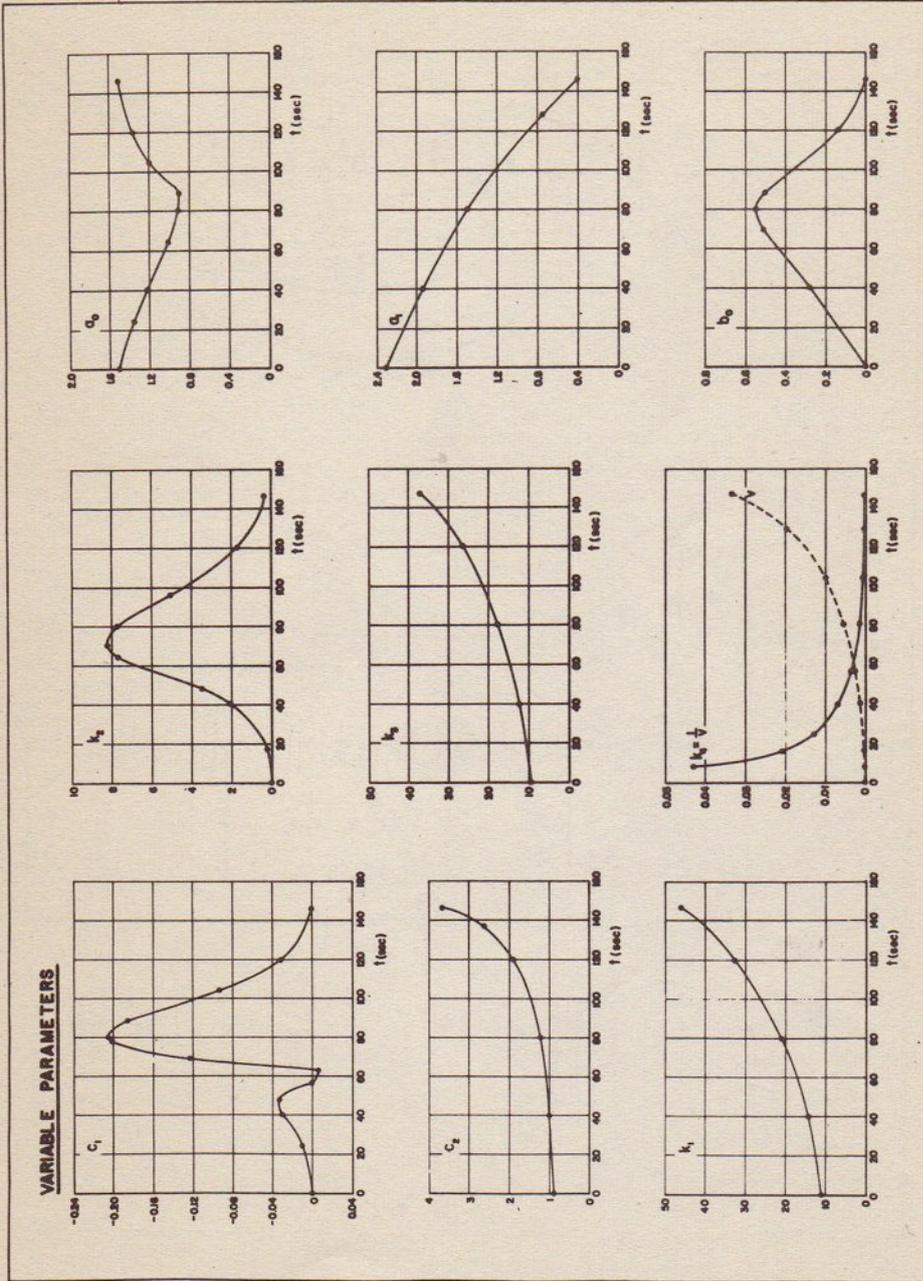


FIG. 5

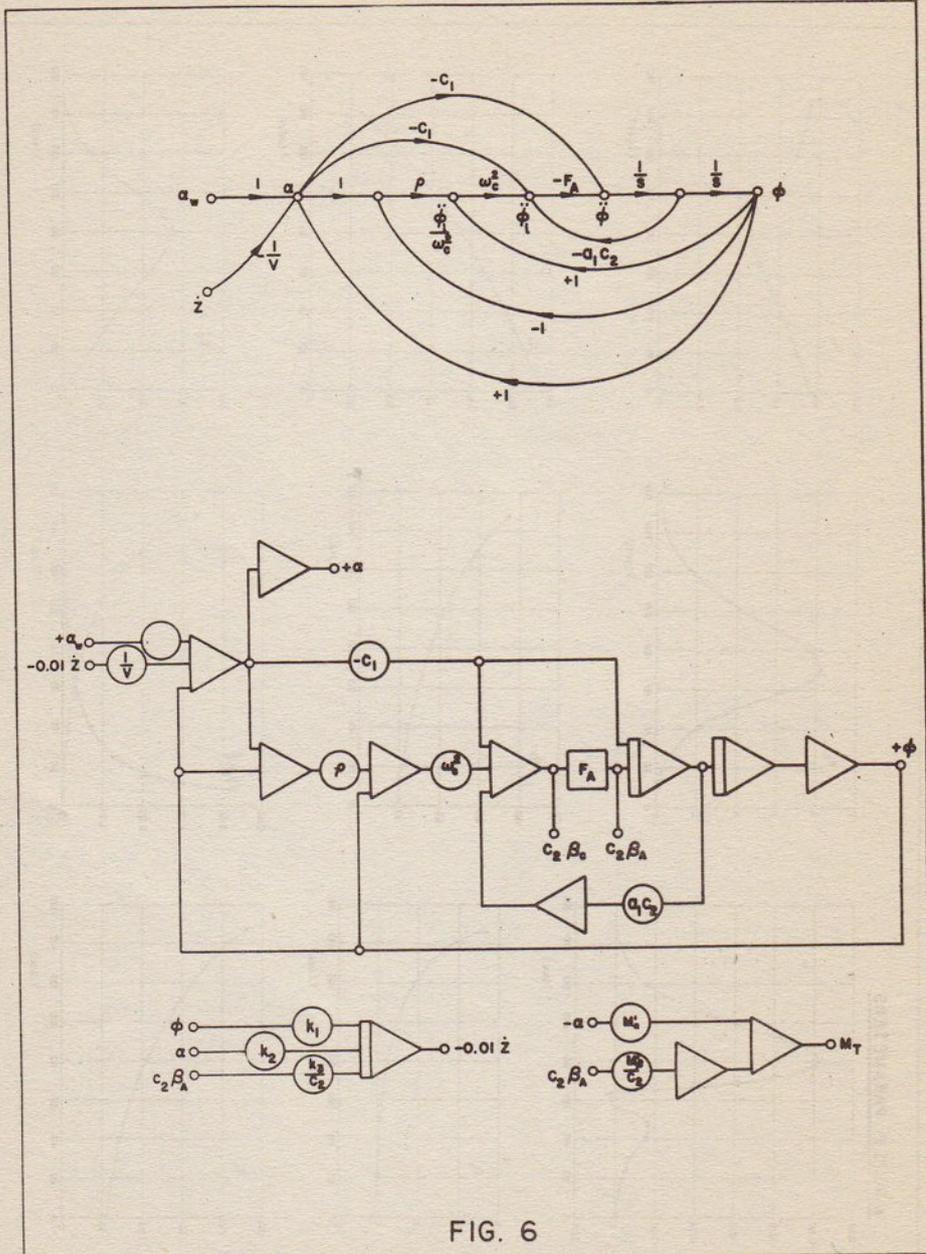
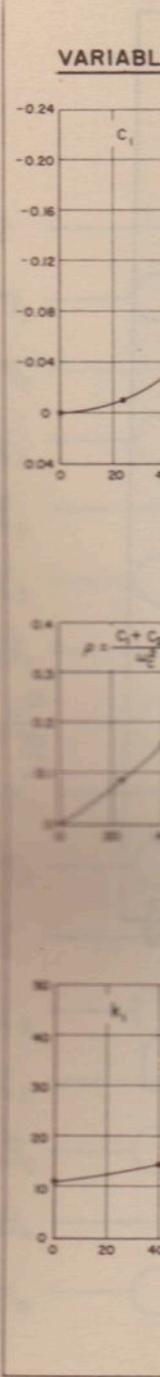


FIG. 6



**VARIABLE PARAMETERS**

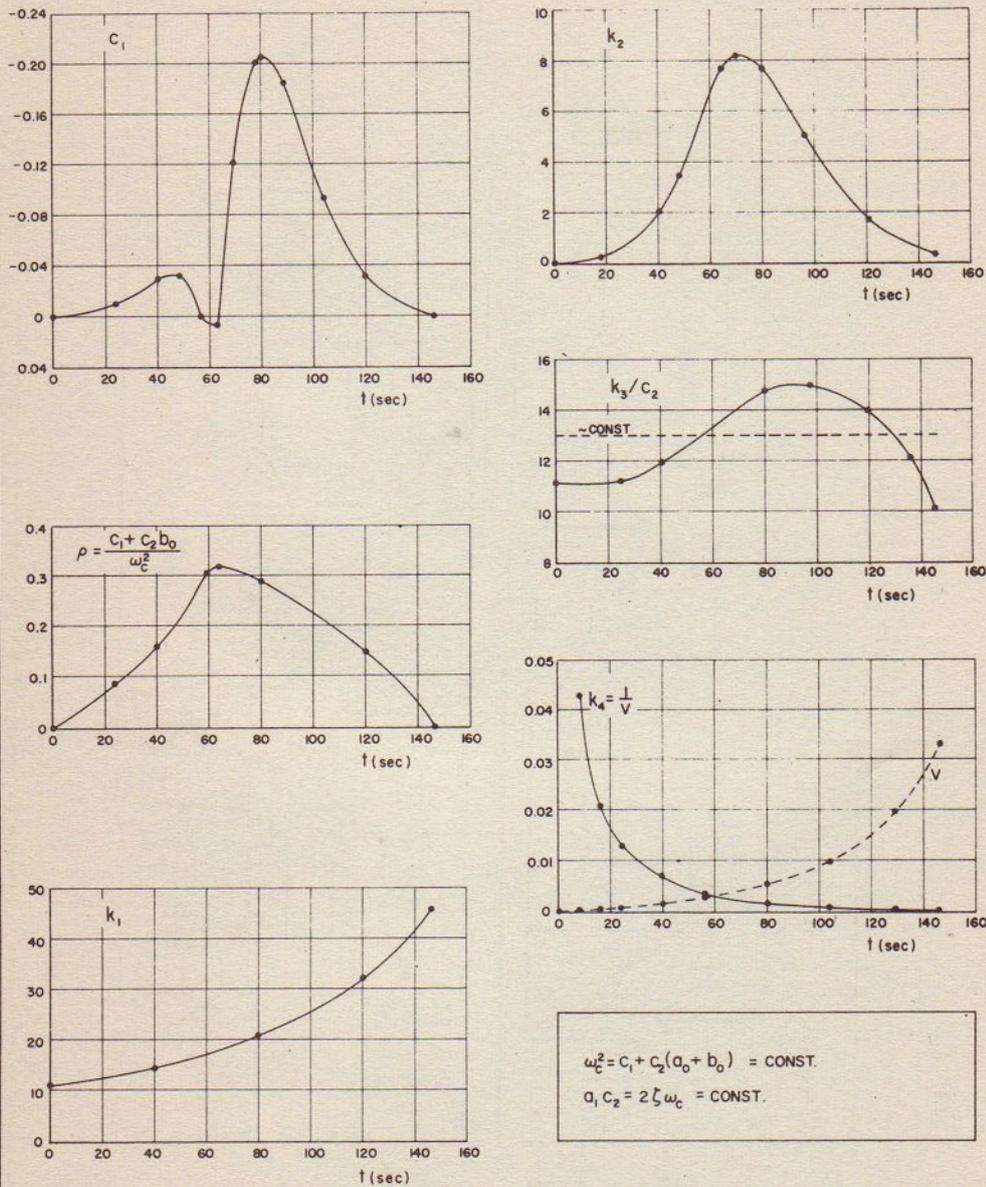


FIG. 7

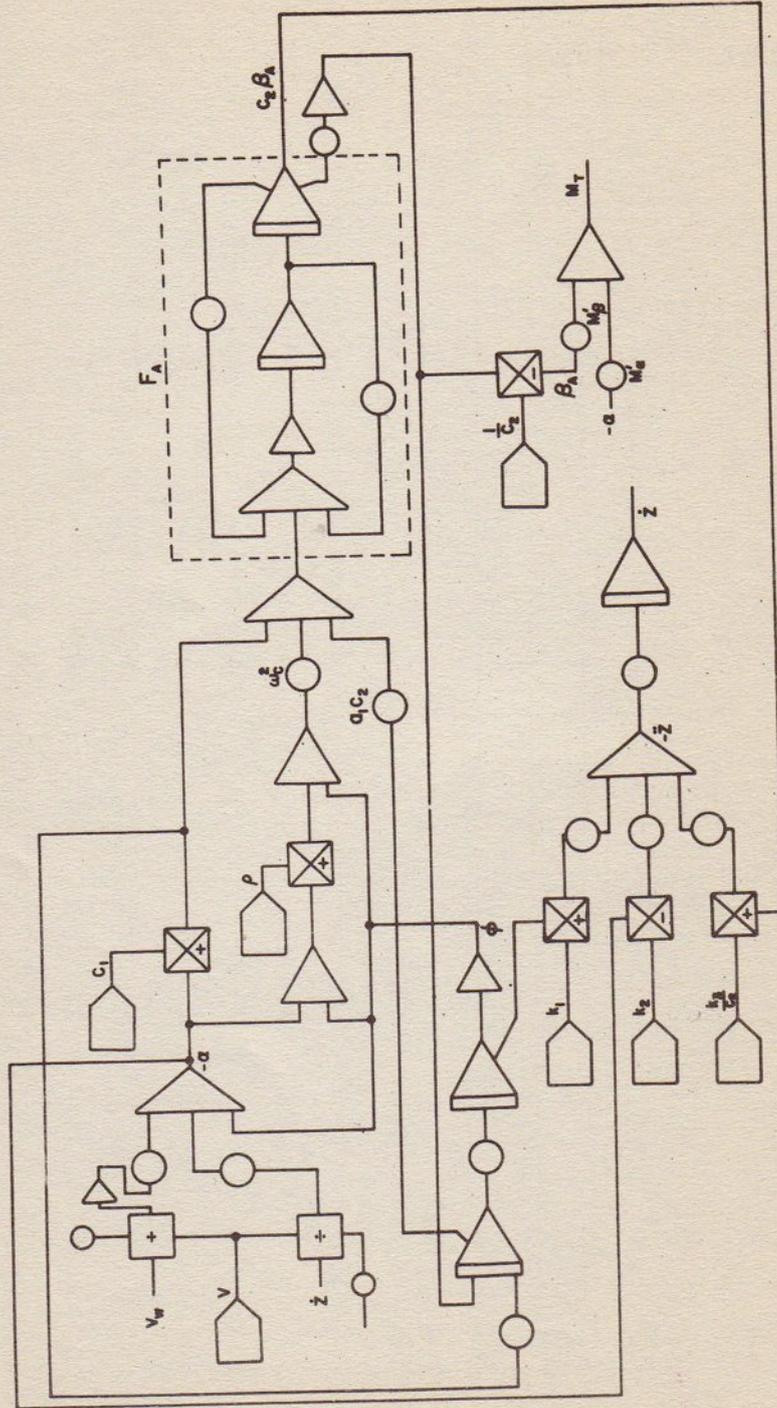
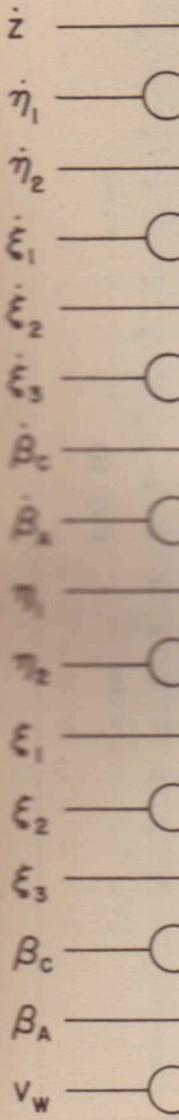


FIG. 8



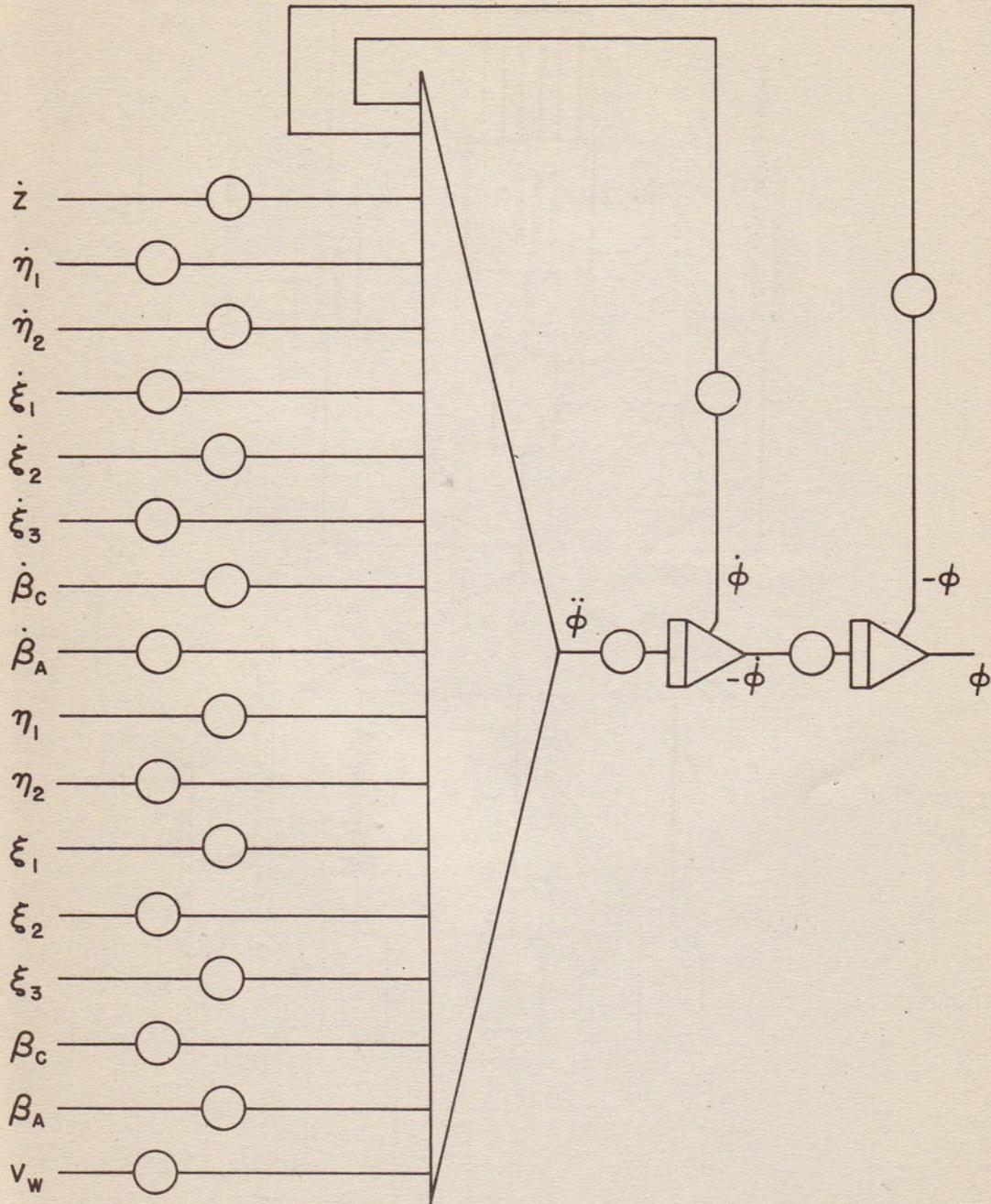


FIG. 9

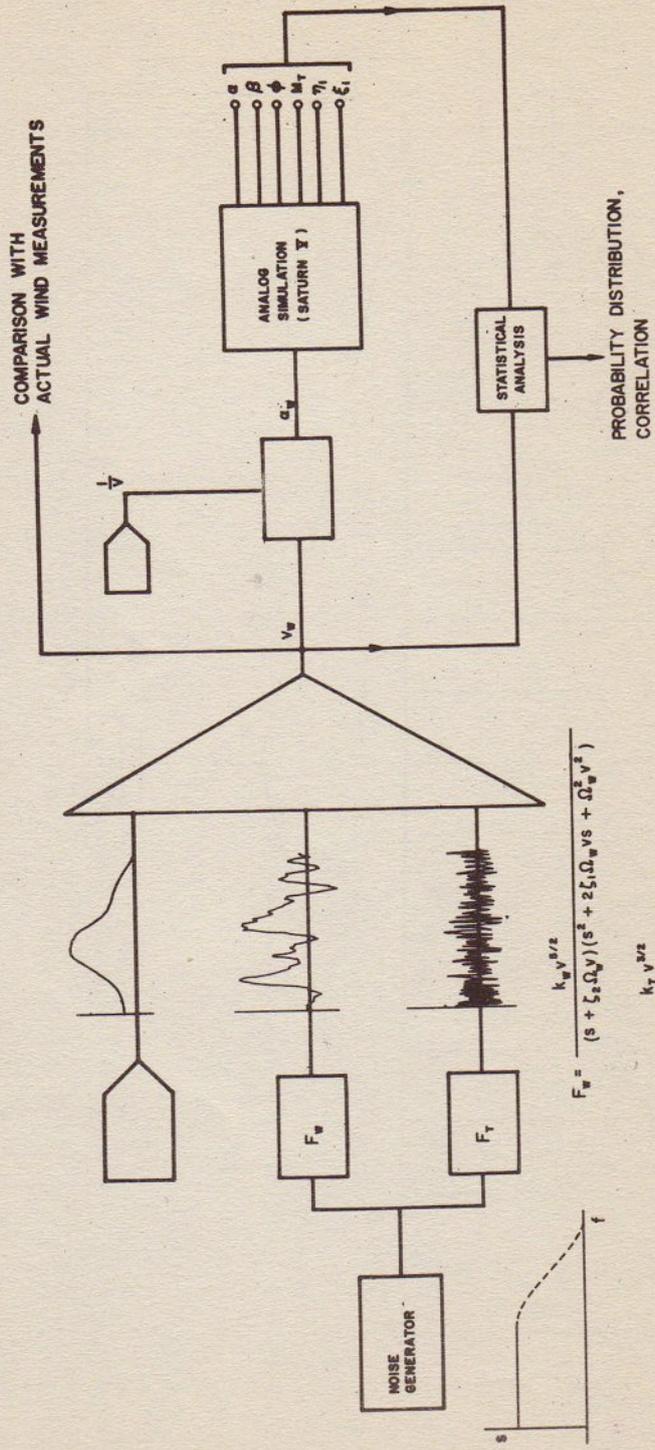
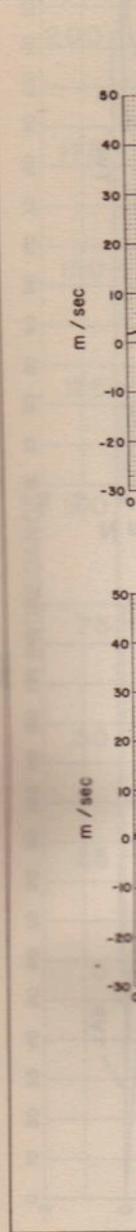


FIG. 10



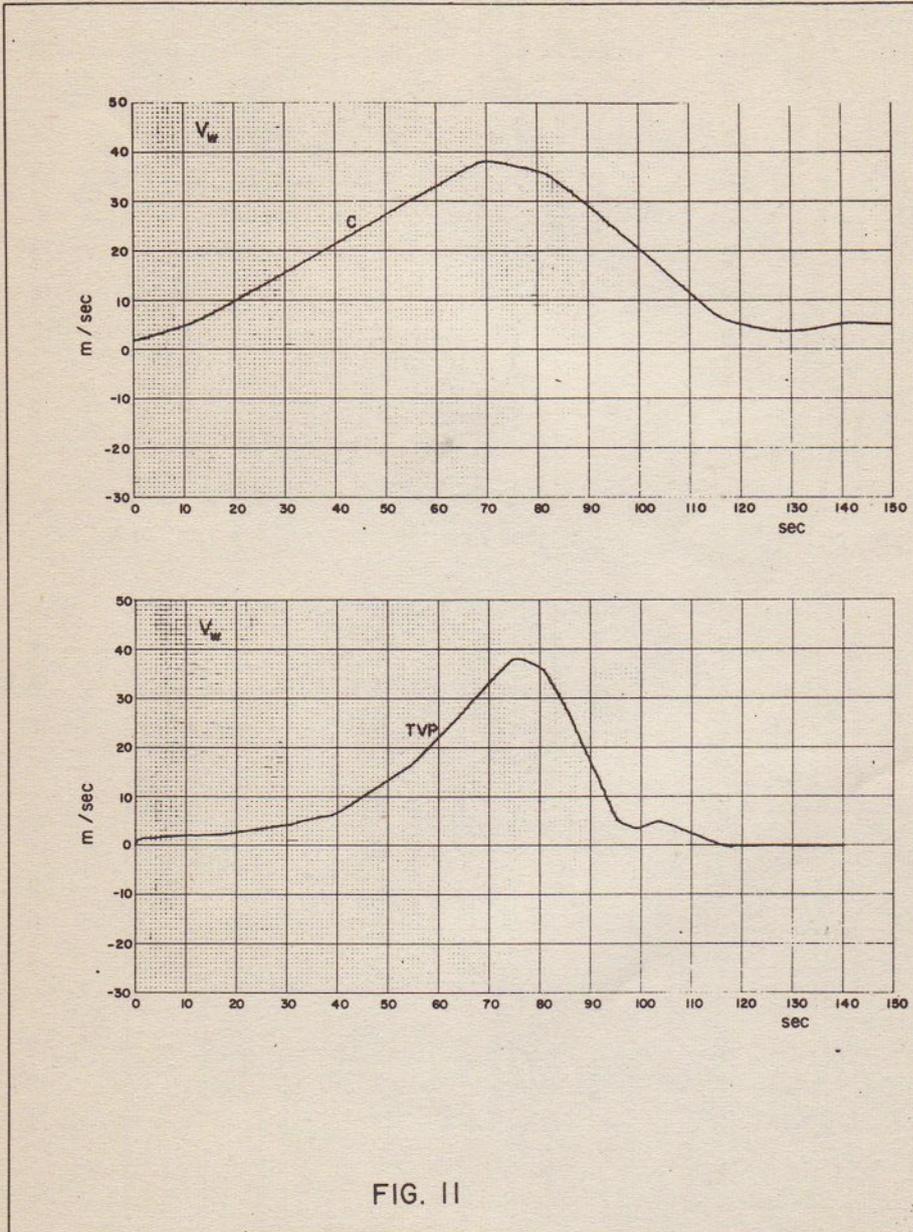


FIG. II

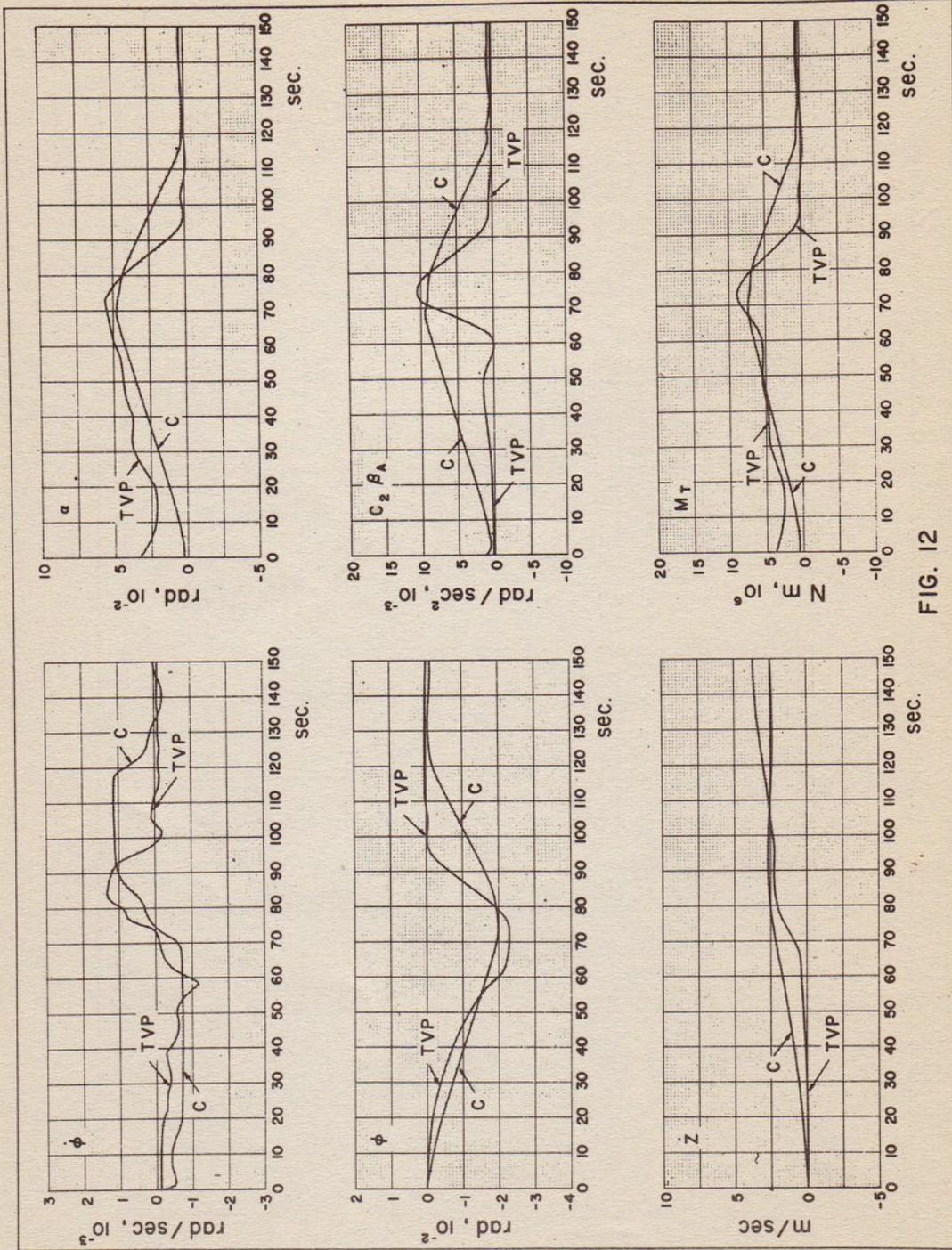


FIG. 12

EXCEEDANCES

0 25 50 75 100 125 150 175 200

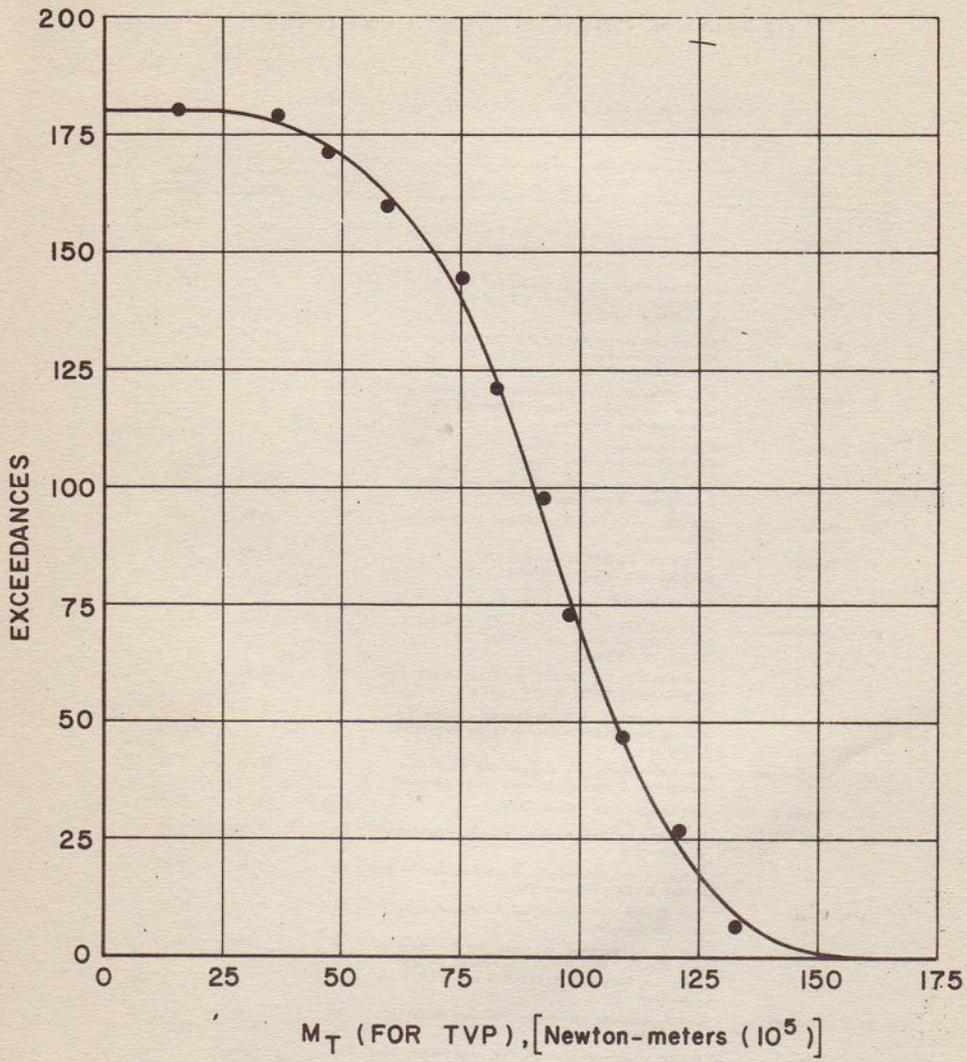


FIG. 13



FHS

SPECIAL-DO

**TAGUNGSBERICHTE**  
der  
**HERMANN OBERTH-GESELLSCHAFT**

Vertrieb:

EB6-Offsetdruck, 3 Hannover-Linden, Ungerstraße 13  
Tel. 44 20 48

Lfd. Nr.	Autor	Titel	Seitenzahl	Verkaufspreis	DRG.-Preis DM
1	Rohrer	Grundlegende Begriffe für die Navigation bemannter Flugkörper im interplanetaren und interstellaren Raum	43	10,00	7,00
2	Aldrich-Sanchini	DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 1,500,000 POUND-THRUST SPACE BOOSTER ENGINE	24	5,50	4,00
3	Büchner	Ein ausgewähltes Kapitel aus der Chemie der Raketentreibstoffe, 1. Mitteilung: Flüssige Brennstoffe	11	3,00	2,00
4	Campbell	Eine Analyse der Entwicklungs- und Betriebskosten von großen Trägerraketen für die Erforschung der Planeten	30	7,00	5,00
5	Stumpf	Raketentriebwerke für Oberstufen auf mittel- und hochenergetischer Basis	38	8,50	6,00
6	Rheinfurth	Das Verhalten von Raumfahrzeugen im atmosphärischer Turbulenz	35	7,50	5,50
7	Hartmann	Die Bedeutung der Druckfallkrankheit für die Raumfahrer	9	2,50	1,75
8	Stampf	SYSTEM PERFORMANCE OF METEOROLOGICAL SATELLITES	14	3,50	2,50
9	Fasan	Raumfahrt und Raumrecht	16	4,00	2,80
10	Generales	ADVANCED PATHOLOGICAL CONSIDERATIONS IN MAN RELATIVE OF WEIGHTLESSNES	12	3,00	2,20
11	Claus	A METHOD OF ORBIT REFINEMENT FOR COMMUNICATION SATELLITE SYSTEMS	54	12,00	8,50
12	Hohmann	Die Atlas-Mercury Start-Rakete und die Erhöhung der Flugzuverlässigkeit für bemannte Raumflüge	1	0,30	0,20
13	Dornberger	Die Entwicklung und Zukunft des wiederverwendbaren Raumtransporters (+8 Fotos)	33	10,75	7,50
14	Oberth	Das elektrische Raumschiff	46	10,75	7,50
15	Billig	Probleme bei der Auslegung eines Raumtransporters	24	5,50	4,00
16	Öry	Statische und dynamische Probleme der 3. Stufe der ELDO Trägerrakete	32	7,50	5,25
17	Fuchs	Der Einfluß des Windes auf Aufstiegsbahnen von Höhenraketen	26	6,50	4,50
18	Bergquist	Der Zusammenhang zwischen der Leistung und dem Gewicht von Raketenoberstufen bei der Wahl von flüssigem Wasserstoff oder RP 1 als Treibstoff	9	2,50	1,75
19	Steinhoff	Die Ausnutzung planetarer Hilfsquellen für die Raumfahrt	43	10,00	7,00
20	Nagy	Einige Gesichtspunkte bei der analytischen Behandlung von Raumfahrtssystemen	22	5,50	3,75
21	Hoelker	Eine Übersicht über Freiflugbahnen zwischen Erde und Mond mit Herausstellung charakteristischer Feldeigenschaften (Fotos)	30	10,00	7,00
22	Gross	Raumfahrt und Weltbild	14	3,50	2,50
23	Kröger	Navigations- und Steuerungsgeräte für große Trägerraketen	20	5,00	3,50
24	Debus	Neuartige Hochleistungs-Anlagen für Montage, Test und Abschluß von Raumfahrzeugen (Fotos)	60	17,00	12,00
25	Hüter	Überblick über leichte und mittlere Raketen der zivilen Raumschiffahrt in den Vereinigten Staaten (Fotos)	35	12,00	9,00