

# Das Raketengeschoss "V 2"

Autor(en): **Roth, Franz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **125/126 (1945)**

Heft 7

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-83602>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Inhalt: Das Raketengeschoss «V2». — «Tunnelgeologie». — Grundlagen zur Betonprüfung auf der Baustelle. — Aktuelle Fragen des Transformatorbaues. — Ideenwettbewerb für die Gestaltung des Seeufers in Weesen (St. Gallen). — Mitteilungen: Die Wärmepumpe als Ergänzung industrieller Kälteanlagen. Persönliches. Eidg. Techn. Hochschule. —

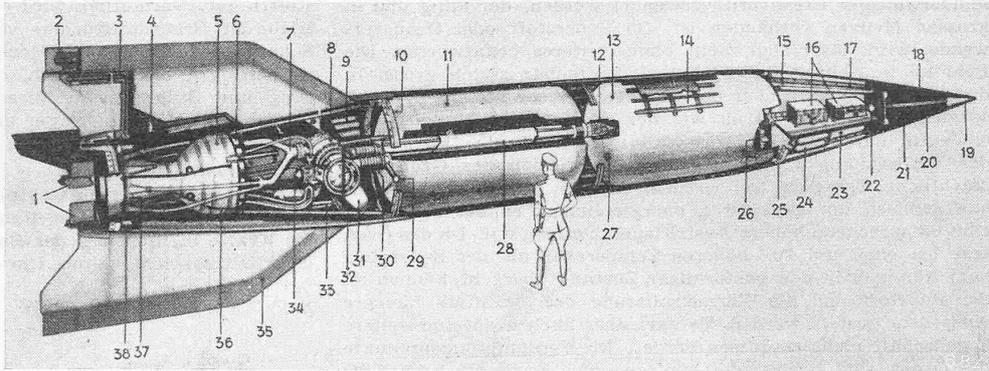
Nekrologe: Pierre Rambal. Rudolf Zeller. Maurice de Courten. Joh. Scheier. — Wettbewerbe: Wohnkolonie «Im Dörfli» der Firma Lindt Sprüngli, Kilchberg/Zch. — Literatur. Mitteilungen der Vereine. Vortragskalender.

Band 125

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Verelnsorgane nicht verantwortlich  
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Nr. 7

- Abb. 1. Schema des Raketengeschosses nach englischer Darstellung
- 1 innere Steuerklappen
  - 2 äussere Steuerklappen
  - 3 Kettenantrieb zu den äusseren Steuerklappen
  - 4 Elektromotor
  - 5 Lavaldüse
  - 6 Verbrennungsräume
  - 7 Alkoholzufuhr von der Brennstoffpumpe her
  - 8 Turbinen-Pumpenaggregat
  - 9 Pressluftflaschen
  - 10 hinterer Spant und Verstärkungsring für Transport
  - 11 flüssiger Sauerstoff
  - 12 gesteuertes Alkoholausslassventil
  - 13 Alkoholbehälter
  - 14 Schale des Raketenkörpers
  - 15 Raum für die Steuerorgane
  - 16 Radioausrüstung
  - 17 Leitung vom Alkoholbehälter zum Sprengkörper
  - 18 Sprengladung
  - 19 Zünder
  - 20 Kabel zum Zünder
  - 21 Leitung für Zündstift
  - 22 elektr. Zünder des Sprengkörpers
  - 23 Sperrholzrahmen
  - 24 Stickstoffflaschen
  - 25 vorderer Spant und Verstärkungsring
  - 26 Kreisel für Steuerung
  - 27 Alkoholeinfüllstutzen
  - 28 doppelwandige Alkoholleitung zur Pumpe
  - 29 Sauerstoffeinfüllstutzen
  - 30 flexible Verbindungsleitung
  - 31 Wasserstoffsperoxybehälter
  - 32 Rohrrahmen des Turbinen-Pumpenaggregates
  - 33 Permanganatbehälter (dahinter Gasgenerator)
  - 34 Sauerstoffverteiler
  - 35 Stabilisator
  - 36 Alkoholleitung zur Hilfskühlung
  - 37 Alkoholeinlass in die Doppelwand
  - 38 elektrohydraulische Servomotoren



Das Raketengeschoss „V 2“

Von Dipl. Ing. FRANZ ROTH, Zürich

[Vorbemerkung der Redaktion. Wir bringen hier dieses Kriegsinstrument nur deshalb zur Sprache, weil die daran geknüpften theoretischen Ausführungen im Hinblick auf den Raketenmotor und den in der Zukunft auch für Friedenszwecke bedeutsamen Stratosphärenflug von allgemeinem Interesse sind.]

Neben der bekannten Flügelbombe V 1 wird seit einigen Monaten von Deutschland eine weitere Fernwaffe in Form des Raketengeschosses V 2 gegen die Alliierten eingesetzt. Das Geheimnis der V 2 wird womöglich noch strenger gewahrt als bei der V 1, über die ja bis heute noch keine deutsche technische Darstellung erfolgt ist. Da aber inzwischen einige, verhältnismässig unbeschädigte Blindgänger aufgefunden wurden, sind unlängst aus englischer offizieller Quelle einige technisch interessante Angaben gemacht worden, aus denen sich verschiedene Schlüsse ziehen lassen.

Nach diesen Meldungen ist die V 2 (Abb. 1) ein geschossförmiger Körper von etwa 1,6 m Durchmesser und 15 m Länge. In der spitz zulaufenden Nase befindet sich die Sprengstoffladung von etwa 1000 kg; in getrennten Behältern wird der Treibstoff mitgeführt, der aus Alkohol und flüssigem Sauerstoff besteht. Durch Pumpen wird der Brennstoff in die Brennkammer gefördert, wo die Verbrennung stattfindet, worauf durch 18 getrennte Düsen die Gase ausgestossen werden. Am Schwanz des Geschosses befinden sich vier Stabilisierungsflossen. Das Gesamtgewicht der V 2 wird auf 12 t geschätzt, der Abschuss erfolgt auf einer fast senkrechten Rampe, durch elektrische Zündung des Brennstoffes. Die Reichweite beträgt 300 bis 320 km, wobei Höhen von 100 km und Geschwindigkeiten von 4800 km/h erreicht werden. Nach etwa einer Minute wird die Brennstoffzufuhr abgestellt, worauf die weitere Bahn als freifliegendes Geschoss durchheilt wird. Wirkung und Zielgenauigkeit der neuen Fernwaffe werden nach der englischen Quelle etwa jener der fliegenden Bombe V 1 gleichgesetzt<sup>1)</sup>. Allerdings kann die V 2 nicht mit den üblichen Abwehrwaffen bekämpft werden. Leider fehlen Angaben darüber, wieviel Brennstoff in der Zeiteinheit verbrannt wird, wie die Verbrennung geregelt ist, und in welchem Punkte der Bahnkurve die Geschwindigkeit von 4800 km/h (= 1,35 km/sec) erreicht wird.

Nach den neuesten Angaben bestätigt es sich also, dass die Fernwaffe V 2 durch reinen Raketenantrieb fortbewegt wird und wir wollen versuchen, einige weitere Kennzeichen dieser Antriebsart abzuleiten.

<sup>1)</sup> Die Hauptmerkmale der V 1 sind:  
 Gesamtgewicht = 3000 kg      Geschwindigkeit = 600 km/h  
 Sprengstoff = 1000 kg      Flughöhe = 1000 m  
 Brennstoff = 600 l Benzin      Reichweite = 250 km  
 Siehe z. B. Technische Beilage der «N. Z. Z.» vom 6. Sept. 1944.

1. Der Raketenantrieb

Die Druckdifferenz zwischen dem Brennraum der Rakete und seiner Umgebung bewirkt, dass die verbrannten Gasmassen mit grosser Geschwindigkeit durch die Düse austreten. Zur Beschleunigung dieser Gasmassen muss eine Kraft angewendet werden; ihre Reaktion auf den Raketenkörper ist dessen Antriebskraft. Dieser Schub ist

$$S = \frac{G' \cdot c}{g}$$

worin  $G'$  das sekundlich aus der Düse austretende Gewicht und  $c$  die Auspuffgeschwindigkeit bedeuten.

Wie jede Umformung von Wärmeenergie, ist auch dieser Vorgang mit einem Wirkungsgrad behaftet. Die zur Verfügung stehende Brennstoffenergie sei  $E$  (mkg/kg), dann ist

$$\frac{G}{2g} c_{th}^2 = E \cdot G$$

und

$$c_{th} = \sqrt{2gE}$$

die theoretische Austrittsgeschwindigkeit. Vergleicht man die effektive Austrittsenergie mit der theoretisch aus der Treibstoff-Energie errechneten, so gelangt man zum inneren Wirkungsgrad des Raketenmotors

$$\eta_i = \left( \frac{c}{c_{th}} \right)^2$$

Aber nicht nur die Umwandlung der Wärme in kinetische Energie ist mit einem Wirkungsgrad behaftet, sondern auch die Umwandlung der kinetischen Energie der Auspuffgase in nutzbringende Arbeit<sup>2)</sup>. Da bei einer Waffe der energetische Wirkungsgrad nicht im Vordergrund steht, möchten wir auf diese Fragen nicht näher eingehen. Es sei nur bemerkt, dass sehr hohe Austrittsgeschwindigkeiten bei relativ kleinen Fluggeschwindigkeiten zu grossen Strahlverlusten führen.

2. Der Treibstoff

Ein charakteristisches Merkmal der Raketen ist der Umstand, dass nicht nur der eigentliche Brennstoff, sondern auch der zur Verbrennung notwendige Sauerstoff im Raketenkörper mitgeführt werden muss. In Tabelle I sind einige Treibstoffkombinationen zusammengestellt. Die V 2 soll mit einem Gemisch aus Alkohol und flüssigem Sauerstoff betrieben werden. Ob es sich beim Sauerstoff um  $O_2$  oder  $O_3$  handelt, ist noch nicht bekannt.

Es wäre naheliegend, eine Rakete mit dem energiereichsten Brennstoff anzutreiben (etwa Benzin), um die grösste Leistung herauszuholen. Bei der Flüssigkeitsrakete muss man aber auch noch anderen Umständen Rechnung tragen. Da für jedes kg

<sup>2)</sup> Siehe z. B. R. Sängler, Raketen-Flugtechnik. Ferner in SBZ: K. Baetz, Der Raketenmotor, Bd. 92, S. 98\* (1928). E. Sängler, Der Verbrennungs-Raketenmotor, Bd. 107, S. 13\* (1936). K. H. Grossmann, Der Wirkungsgrad des Raketenmotors, Bd. 120, S. 223\* (1942).

Benzin 3,5 kg Sauerstoff an Bord mitgeführt werden muss, ist schon aus diesem Grund der Alkohol vorzuziehen, da er mit 2,08 kg O<sub>2</sub> einen Treibstoff gibt, der nur etwa 10 % weniger Energie trägt als das Benzngemisch, obwohl sich die Brennstoffheizwerte etwa wie 6:10 verhalten. Aber das Alkoholgemisch hat noch einen weiteren Vorteil. Die theoretische Auspuffgeschwindigkeit liegt niedriger als beim Benzngemisch, folglich treten auch kleinere Strahlverluste auf. Statt Alkohol kann auch minderwertiger Brennsprit verwendet werden, der billig und in grossen Mengen vorhanden ist. Ob Sauerstoff oder Ozon verwendet wird, lässt sich nicht ohne weiteres beantworten. Die Behälter im Schnittbild der V 2 sind offenbar gleich gross. In diesem Falle müsste aber der Sauerstoff mehr als das doppelte spezifische Gewicht haben wie der Alkohol (0,8 kg/dm<sup>3</sup>), was eindeutig nur beim Ozon der Fall ist (Tabelle II). Da bei der Verbrennung vorausgehenden Dissoziation des Ozons beträchtliche Energien frei werden, ist das Alkohol-Ozon-Treibstoffgemisch um etwa 20 % energiereicher; es hat aber auch eine entsprechend höhere Austrittsgeschwindigkeit. Da das Ozon erst bei einer um 70° höheren Temperatur als der Sauerstoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht, können an den Baustoff und die Wärmeisolierung des Behälters kleinere Ansprüche gestellt werden. Es darf aber auch noch eine weitere Eigenschaft nicht vergessen werden. Die Verdampfungsprodukte des Ozons sind hochgradig explosiv, also muss der beim Auftreffen der Rakete noch vorhandene Treibstoff zur Zerstörungswirkung des eigentlichen Sprengstoffes hinzugerechnet werden.

Aus der Abbildung kann der totale Tankinhalt auf 4,5 bis 5,5 m<sup>3</sup> geschätzt werden, was auf eine Treibstoffzuladung von 6 bis 8 t schliessen lässt. Da die Treibstoffzufuhr nach etwa 60 s abgestellt wird, kann mit einer sekundlichen Verbrennung von 100 bis 130 kg Treibstoff gerechnet werden.

Der Treibstoff wird vom Pumpenaggregat in die Brennräume verbracht. Wenn man vorerst annimmt, dass nur der Alkohol auf übliche Weise in die Brennräume gepumpt wird, ist schon dafür eine reine Förderleistung von schätzungsweise 250 PS notwendig.

Der Verbrennungsvorgang ist in 18 «Motoren» unterteilt. Dadurch kann die Verbrennung besser beherrscht werden, da pro Brennraum nur eine Treibstoffmenge von 5,5 bis 7,5 kg/s verarbeitet wird. Die Unterteilung hat aber auch noch den weiteren Vorteil, dass die für die Energieausnutzung eminent wichtigen Austrittsdiffusoren besser gestaltet werden können. Ueber die Dimensionierung der Brennräume lässt sich nach Sängler folgendes aussagen: Der notwendige Brennraum ist:

$$V_{\text{Brennraum}} = \frac{G' E t}{p_0} \frac{\kappa - 1}{\kappa}$$

worin G' das sekundlich benötigte Antriebsgewicht, E den Energie-Inhalt, t die zur Verbrennung notwendige Zeit und p<sub>0</sub> den Druck im Brennraum bedeutet (κ ist für zweiatomige Gase = 1,4). Da G', E und die Brennzeit gegebene Grössen sind, wird man den Druck so hoch wählen, wie es aus konstruktiven Gründen zulässig ist, wobei nicht nur die Festigkeit eine Rolle spielt, sondern auch die Leistungsfähigkeit der Treibstoffpumpen, da diese bei einer Gleichdruckverbrennung den Betriebsstoff gegen den im Brennraum herrschenden Druck fördern müssen. Eine Hochdruck-Alkoholpumpe bietet heute keine technischen Schwierigkeiten. Wie hingegen der Sauerstoff in den Brennraum gefördert wird, ist nicht ohne weiteres ersichtlich. Aus dem thermodynamischen Zustand im Brennraum kann alsdann, nach den Gesetzen der Gasdynamik, der engste Düsenquerschnitt und der Flächenverlauf des Diffusors bestimmt werden. Wie weit Dissoziationserscheinungen den Verbrennungsvorgang beeinflussen und wie gross die Nachverbrennung im Diffusor ist, sind die eigentlichen Hauptprobleme des Raketenmotors.

Ein weiteres bemerkenswertes Merkmal des Raketenmotors der V 2 ist die Kühlung der Brennräume und der Düsen durch den als Brennstoff mitgeführten Alkohol. Dadurch werden einerseits die Wandtemperaturen in zulässigen Grenzen gehalten,

Tabelle I: Flüssige Brennstoffe

a) mit flüssigem Sauerstoff O <sub>2</sub> :	E mkg/kg	c <sub>th</sub> m/s
Benzin (1 kg C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> + 3,5 kg O <sub>2</sub> )	1,01 · 10 <sup>6</sup>	4450
Benzol (1 kg C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 3,4 kg O <sub>2</sub> )	0,93 · 10 <sup>6</sup>	4270
Alkohol (1 kg C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH + 2,08 kg O <sub>2</sub> )	0,89 · 10 <sup>6</sup>	4180
b) mit flüssigem Ozon O <sub>3</sub> :		
Benzin (1 kg C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> + 3,5 kg O <sub>2</sub> )	1,25 · 10 <sup>6</sup>	4960
Benzol (1 kg C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 3,4 kg O <sub>2</sub> )	1,17 · 10 <sup>6</sup>	4800
Alkohol (1 kg C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH + 2,08 kg O <sub>2</sub> )	1,09 · 10 <sup>6</sup>	4630

andererseits der Brennstoff bereits vorgewärmt. Auf diese Anordnung wurde bereits von Oberth<sup>3)</sup> hingewiesen.

Die Abbildung der V 2 enthält einige Hilfstoffe, deren Zweck nicht ohne weiteres ersichtlich ist. Da die mitgeführte Pressluft offenbar nicht genügen würde, die Turbine des Pumpenaggregates anzutreiben, wird sie voraussichtlich zur Betätigung von Servomotoren benützt.

Wasserstoffsperoxyd und Permanganat sind beides Sauerstoffträger. Vermutlich wird einer dieser beiden Stoffe zum Antrieb der Brennstoffturbine verwendet. Da bei der Turbinen-Schaufelung eine gewisse Höchsttemperatur nicht überschritten werden darf, ist es möglich, dass der Stickstoff zur Verzögerung und Stabilisierung dieses Verbrennungsvorganges dient. Der andere Sauerstoffträger könnte unter Umständen zur Einleitung der Hauptverbrennung beim Start benützt werden.

3. Die Bahnkurve

Aus Abb. 2 sind die Kräfte ersichtlich, die auf die fliegende Rakete wirken. In jedem Punkte der Bahnkurve müssen sich die Kräfte in Richtung der Bahntangente und senkrecht dazu das Gleichgewicht halten. Daraus ergibt sich:

$$S = G \sin \varphi + \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} + W$$

$$G \cos \varphi = \frac{G}{g} \frac{v^2}{\rho}$$

Hierin bedeuten:

S = Raketenschub

G = augenblickliches Raketengewicht

T<sub>t</sub> = Trägheitskraft tangential zur Bahn =  $\frac{G}{g} \frac{dv}{dt}$

T<sub>n</sub> = Trägheitskraft normal zur Bahn =  $\frac{G}{g} \frac{v^2}{\rho}$

$\frac{dv}{dt}$  = Beschleunigung in Richtung der Bahn

W = c<sub>w</sub> q F = Luftwiderstand v = Bahngeschwindigkeit

ρ = Krümmungsradius der Bahn φ = Bahnwinkel

Da es sich um einen Flug mit ständig ändernder Bahngeschwindigkeit handelt und die Rakete keine auftrieberzeugende Flügel besitzt (im Gegensatz zur Flügelbombe V1), kommt den Trägheitskräften eine erhöhte Bedeutung zu. Nach dem Abstellen der Brennstoffzufuhr (S = 0) verhält sich die Rakete wie ein gewöhnliches Geschoss mit der augenblicklichen Bahngeschwindigkeit als Ausgangsgeschwindigkeit und mit der Bahnneigung als Elevationswinkel. Da die V 2 nicht abgeschossen wird, sondern aus eigener Kraft startet, muss sie fast senkrecht auf die Startbahn gestellt werden, damit sie bei den anfänglich kleinen Geschwindigkeiten nicht in eine allzu flache Bahn gerät. Es ist sogar denkbar, dass der Abflug genau senkrecht erfolgt und der Bahnwinkel erst nach Erreichung einer gewissen Höhe (30 bis 40 km) bzw. vor dem Abstellen der Brennstoffzufuhr durch die Steuerorgane auf etwa 45° korrigiert wird (maximale Reichweite). In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass die V 2 zwei verschiedene Steuerflächen besitzt: Ausenliegende, die nur solange wirksam sind, als ein merklicher Staudruck vorhanden ist, sowie innere Steuerflächen, die im praktischen luftleeren Raum von über 40 km immer noch wirksam sind, solange sie im Strahl der Auspuffgase liegen.

Ohne genaue Kenntnis des Abschussvorganges und der Treibstoffdosierung lassen sich unendlich viele Bahnkurven denken. Es sei daher ein willkürliches, aber durchaus mögliches Beispiel herausgegriffen. In der vermutlichen Antriebszeit von 60 s sei der gesamte Brennstoffverbrauch 6 t und zwar gleichmässig 100 kg/s. Mit einer geschätzten Austrittsgeschwindigkeit von 3000 bis 3500 m/s (η<sub>i</sub> = 50 bis 70 %) beträgt der Schub 30 bis 35 t. Die Startneigung sei etwa 75°, damit werden die unteren, dichten Luftschichten mit relativ kleiner Bahngeschwindigkeit durchteilt und der Luftwiderstand brems nicht zu stark. Durch die Schwerkraft wird die Bahnneigung dauernd verkleinert, bis dann schon in grossen Höhen der zur grössten Reichweite gehörende Neigungswinkel von 45° erreicht wird.

<sup>3)</sup> Oberth: Die Rakete zu den Planetenräumen. — Oberth: Wege zur Raumschiffahrt (Verlag Oldenbourg München).

Tabelle II: Kennwerte von flüssigem Sauerstoff O<sub>2</sub> und Ozon O<sub>3</sub>

	Siedepunkt	Schmelzpunkt	kritischer Druck	spez. Gewicht
O <sub>2</sub>	- 183 °C	- 219 °C	51 kg/cm <sup>2</sup>	1,143 kg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	- 112 °C	- 251 °C	67 kg/cm <sup>2</sup>	1,71 kg/m <sup>3</sup>

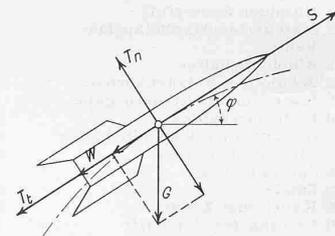


Abb. 2. Gleichgewicht der Kräfte am Raketenkörper

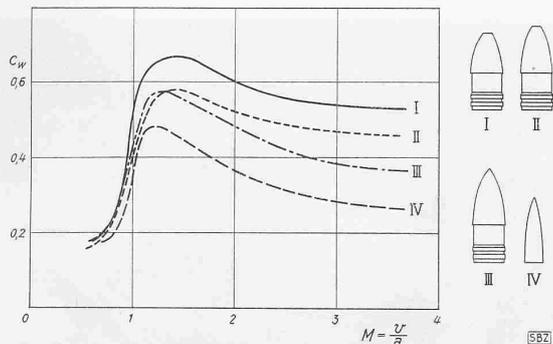


Abb. 3. Luftwiderstand verschiedener Geschossformen bei Unterschall- und Uberschallströmung (nach Eberhard, Becker und Kranz)

Da sich in den Bewegungsgleichungen, mit Ausnahme des Schubes, jede Grösse dauernd ändert (genau genommen nimmt auch die Erdbeschleunigung mit zunehmender Höhe langsam ab) wäre es müssig, in geschlossener Form integrieren zu wollen. Hingegen ist es möglich, die Gleichungen schrittweise zu summieren, wobei bei jedem neuen Schritt die entsprechenden Anfangsbedingungen zu berücksichtigen sind<sup>4)</sup>. Dies gilt vor allem für den Luftwiderstand, der den grössten Aenderungen unterworfen ist, sowie für das Fluggewicht, das ja in der Antriebsperiode kontinuierlich abnimmt.

Für den Luftwiderstand gilt die Bezeichnung:

$$W = c_w \rho / 2 v^2 F$$

In Abb. 3 sind die Widerstandsbeiwerte einiger Geschossformen in Funktion der Mach'schen Zahl (Verhältnis von Bahngeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit) aufgetragen. Dem vorliegenden Fall entspricht wohl am besten die Geschossform IV. Die Tabelle III enthält die Dichtewerte der Luft mit zunehmender Flughöhe nach den Normen der CINA. Da in 40 km Höhe die Luftdichte nur noch etwa  $\frac{1}{1000}$  des Bodenwertes beträgt, kann der Luftwiderstand vernachlässigt und die Bahnkurve als reine Wurfparabel betrachtet werden. Die Widerstandsbeiwerte sind auf den Hauptspant bezogen, der bei der V2 etwa 2 m<sup>2</sup> beträgt.

Die Bahnkurve gemäss Abb. 4 stimmt in grossen Zügen mit den englischen Angaben überein. Nur die Reichweite ist etwa 20% zu klein. Hierzu ist zu bemerken, dass mit etwas anderen Annahmen (grössere Auspuffgeschwindigkeit, grösserer Treibstoffverbrauch usw.) die errechnete Reichweite entsprechend modifiziert werden kann. In diesem Zusammenhang dürfte es vielleicht interessant sein, diese Einflüsse unter vereinfachten Annahmen näher zu betrachten. Wenn man den Luftwiderstand vernachlässigt und eine senkrechte Bahn annimmt, lassen sich Steiggeschwindigkeit und Steighöhe in geschlossener Form darstellen.

Es ist:

$$\text{Die Steiggeschwindigkeit: } v = c \ln \left[ \frac{G_a}{G_a - G' t} \right] - g t$$

Die Endgeschwindigkeit nach der Antriebsperiode

$$v = c \ln \left( \frac{G_a}{G_e} \right) - g t_e$$

<sup>4)</sup> Die Fliehkraftentlastung als Folge der Erdrotation spielt bei dieser Bahngeschwindigkeit noch keine Rolle und äussert sich in einer unbedeutenden Vergrösserung der Reichweite.

Tabelle III: Luftdichte in verschiedenen Höhen

H km	$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ kg s}^2 \text{ m}^{-4}$
0	$1,25 \cdot 10^{-1}$
10	$4,20 \cdot 10^{-2}$
20	$9,00 \cdot 10^{-3}$
30	$1,85 \cdot 10^{-3}$
40	$3,80 \cdot 10^{-4}$
50	$7,95 \cdot 10^{-5}$
60	$1,60 \cdot 10^{-5}$
70	$3,40 \cdot 10^{-6}$
80	$7,00 \cdot 10^{-7}$
90	$1,40 \cdot 10^{-7}$
100	$3,00 \cdot 10^{-8}$

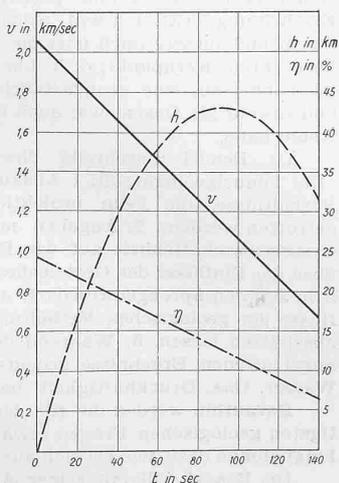


Abb. 5. Steighöhe h, Endgeschwindigkeit v und Wirkungsgrad η der V2 in Funktion der Antriebszeit bei senkrechter Flugbahn ohne Luftwiderstand.  $G_a/G_e = 2$

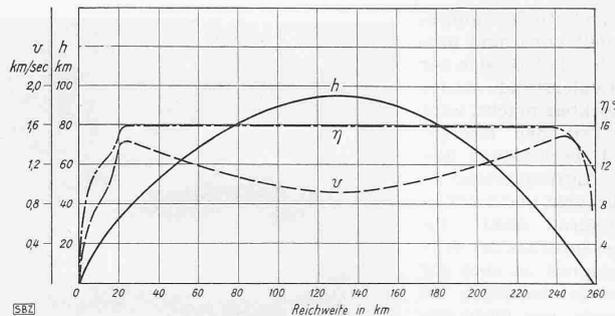


Abb. 4. Flugbahn h, Bahngeschwindigkeit v und Wirkungsgrad η der V2

Die Steighöhe

$$h = c t \left[ 1 + \ln \left( \frac{G_a}{G_a - G' t} \right) \right] - c \frac{G_a}{G'} \ln \left( \frac{G_a}{G_a - G' t} \right) - g/2 t^2$$

Die Endhöhe nach der Antriebsperiode

$$H = c t_e \left[ 1 - \left( \frac{G_e}{G_a - G_e} \right) \ln \frac{G_a}{G_e} \right] - g/2 t_e^2$$

worin c die Auspuffgeschwindigkeit,  $G_a$  das Abfluggewicht und  $G_e$  das Endgewicht nach der Antriebsperiode bedeuten.  $G'$  ist die sekundlich verbrannte Treibstoffmenge. Für  $g = 0$  gehen diese Beziehungen in die bekannte Raketengleichung für das schwerefreie und widerstandsfreie Feld über.

In Abb. 5 sind diese Beziehungen aufgetragen. Die maximale Geschwindigkeit kann nicht erreicht werden, denn dazu müsste die Beschleunigung  $\infty$  gross werden. Ebenso kann die Antriebszeit nicht beliebig verlängert werden, da im Grenzfall der Startschub mindestens so gross wie das Raketengewicht sein muss. Jede andere Annahme ist jedoch denkbar.

Während der Luftwiderstand in der Antriebsperiode keine grosse Rolle spielt und in grossen Höhen ganz vernachlässigt werden kann, kommt ihm in der letzten Phase der Bahnkurve umso grössere Bedeutung zu, da ja das Geschoss jetzt mit enormer Geschwindigkeit in dichtere Luftschichten vordringt. Für die Geschwindigkeit von 1000 m/s seien in Bodennähe einige Zahlen genannt:

- Luftwiderstand  $\cong 30\,000 \text{ kg}$
- Verzögerung  $\cong 4 \text{ g}$
- Temperaturerhöhung im Staupunkt  $\cong 500^\circ \text{ C}$
- Druckerhöhung im Staupunkt  $\cong 34 \text{ at}$

Für die Temperaturerhöhung gilt die Beziehung  $\Delta T = \frac{A v^2}{2 g c_p}$

und das Druckverhältnis ist  $\left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \left( \frac{T}{T_0} \right)$

#### 4. Der Energieaufwand

Um einen Anhaltspunkt über die Güte der Energieumsetzung zu haben, lässt sich ein Wirkungsgrad, als Verhältnis der kinetischen und potentiellen Energie der Rakete zur Energie des Treibstoffes, definieren. Nach der Antriebsperiode lässt sich dieser Wirkungsgrad in der Form schreiben:

$$\eta = \frac{\left( \frac{v^2}{2g} + H \right) G_e}{E (G_a - G_e)}$$

Diese Beziehung ist in den Abbildungen 4 und 5 aufgetragen. Nach der Antriebsperiode bleibt der Wirkungsgrad im widerstandsfreien Feld vorerst konstant, da nur kinetische Energie

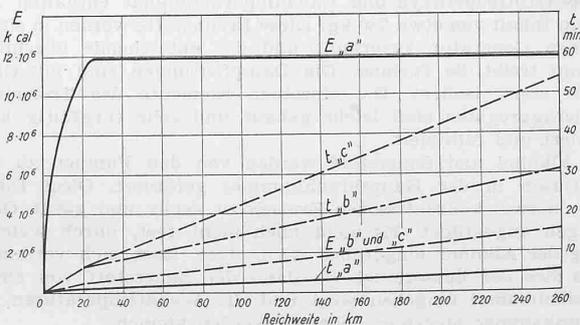


Abb. 6. Vergleich von Energieaufwand E und Flugzeit t der V2 mit zwei modernen Flugzeugen

Kurven a für die V2  
 Kurven b für einmotorigen Jäger von 6000 kg Fluggewicht  
 Kurven c für Douglas D C3 von 12000 kg Fluggewicht

in potentielle umgewandelt wird und umgekehrt. Sobald sich der Luftwiderstand wieder bemerkbar macht, wird ein Teil der Energie zur Ueberwindung dieses Luftwiderstandes verbraucht und der Wirkungsgrad sinkt. Interessanter als der Wirkungsgrad ist aber der absolute Aufwand an Energie, um diese Geschoss-Geschwindigkeit zu erreichen. In Abb. 6 sind diese Werte aufgetragen und mit zwei Flugzeugen heutiger Bauart verglichen.

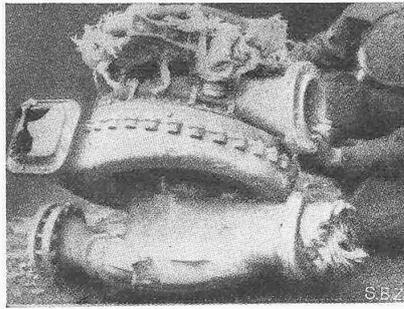


Abb. 7. Das Turbinen-Pumpen-Aggregat. Die einstufige Turbine treibt die Sauerstoffpumpe (oben) und die Alkoholpumpe (unten)

In der Antriebsperiode beträgt die Brennstoffleistung der V 2 bei einem Treibstoffverbrauch von 100 kg/s rund 200 000 kcal/s oder 1,15 Mio PS. Um zu einer Antriebsleistung ähnlicher Grössenordnung zu gelangen, muss als Vergleich ein grosser Ozeandampfer herangezogen werden. Z. B. besitzt die «Queen Mary» mit ihren 73 000 BRT eine Antriebsleistung von 190 000 WPS; mit einem totalen Brennstoffverbrauch von 290 g/PSH (alle Hilfsantriebe inbegriffen), entspricht dies einer Brennstoffleistung von nur 875 000 PS oder 75% der V 2. Es ist aber zu beachten, dass diese enorme Leistung nur etwa 60 Sekunden lang aufgewendet wird. Andererseits könnte z. B. ein Verkehrsflugzeug vom Typ Douglas DC 3 mit dem Brennstoffaufwand von 6000 kg 20 Passagiere in rund 20 Stunden auf eine Entfernung von etwa 6000 km befördern.

Die Alliierten betonen die technische Leistung bei der Realisierung der V 2. Diese besteht vor allem in der Beherrschung der Verbrennungsvorgänge so gewaltiger Energiemengen, dass kurzzeitig Antriebsleistungen zu Stande kommen, die bis anhin nicht üblich waren und zu aussergewöhnlichen Geschwindigkeiten führen. Ob die Wirkung der V 2 diesen unglaublichen Aufwand rechtfertigt, entzieht sich noch der Beurteilung. Beim Uebergang von der zerstörenden Waffe zu zivilen Verwendungszwecken wird noch eine ganze Anzahl von Problemen zu lösen sein.

#### 5. Nachtrag

Nach Abschluss der vorliegenden Arbeit ist ein englischer Aufsatz<sup>5)</sup> über dieses Thema bekannt geworden, der weitere bemerkenswerte Einzelheiten enthält, die unsere Annahmen im wesentlichen bestätigen.

Die Hauptabmessungen der V 2 betragen darnach 14 m in der Länge und 1,65 m Durchmesser. Die Haupttreibstoffbehälter haben einen Inhalt von je 4,5 m<sup>3</sup>, bestehen aus einer Aluminiumlegierung und sind mit Aethylalkohol und flüssigem Sauerstoff gefüllt. Das anfängliche Treibstoffgewicht beträgt 3,4 t Alkohol und 5 t Sauerstoff. Das Abfluggewicht beläuft sich auf 12 t. Sofern es sich tatsächlich um flüssigen Sauerstoff und nicht um Ozon handelt, verbliebe nach der Antriebsperiode noch 1 t Alkohol, was unwahrscheinlich ist.

Die Abb. 7 und 8 zeigen das Turbinen-Pumpenaggregat zur Treibstoffförderung. Die Turbine besteht aus Leitradsektoren und einem Lauftrad, das die Sauerstoff- und Alkoholpumpe treibt. Die Leistung der Turbine wird auf 500 PS geschätzt. In der Nähe des Pumpenaggregates befinden sich zwei Behälter, die Wasserstoffsperoxyd und Calciumpermanganat enthalten, mit einem Inhalt von etwa 280 kg. Diese Brennstoffe werden in einem kleinen Generator verbrannt und der entstehende überhitzte Dampf treibt die Turbine. Die Dampfleitungen sind mit Glaswolle stark isoliert. Die einzelnen Elemente des Treibstoffförderaggregates sind leicht gebaut und sehr sorgfältig konstruiert und fabriziert.

Alkohol und Sauerstoff werden von den Pumpen zu den 18 Düsen in der Hauptbrennkammer gefördert. Diese Düsen sind in zwei konzentrischen Kreisen zu sechs und zwölf Öffnungen angeordnet. Es steht noch nicht fest, durch welchen Ring der Alkohol eingeführt wird, doch lässt sich vermuten, dass dies der äussere ist, da dann der Sauerstoff von einem Alkoholmantel umgeben wird und die Wandtemperaturen der Brennkammer niedriger gehalten werden können.

Aus den weiteren Angaben ist noch zu vermerken, dass der Stickstoff vermutlich dazu benützt wird, den Druck in den Hauptbehältern während der Antriebsperiode konstant zu halten. Der

<sup>5)</sup> F. C. Sheffield: V2 the German rocket a notable technical achievement of insignificant military value. «Flight» 21. Dez. 1944.



Abb. 8. Demontiertes Aggregat; das Turbinenlauftrad und die Segmente des Leitrades sind sichtbar. Im Vordergrund die mit Glaswolle isolierte Turbinenleitung und ein Sauerstoffverteiler

Start und die Steuerung der Rakete erfolgen in der bereits beschriebenen Weise. Zusätzlich wird noch angeführt, dass die inneren Steuerflächen aus Kohle bestehen sollen, um den hohen Temperaturen der Auspuffgase standzuhalten.

Reichweite, Flughöhe und Geschwindigkeiten werden bestätigt; die Auftreffgeschwindigkeit wird mit 1100 m/s angegeben. Das Bahngeräusch der Rakete wird erst nach der Explosion vernommen. Es wird vermutet, dass die Treibstoffzufuhr vorzeitig abgestellt wird und die Reichweite somit noch vergrössert werden kann.

### «Tunnelgeologie»

Die Mitglieder des Schweiz. Verbandes für die Materialprüfungen der Technik, denen die Post vom 27. Jan. 1945 wieder eine der üblichen, umfangreichen Drucksachensendungen brachte mit Veröffentlichungen über «Das Klopfen der Ottomotoren», «Isolierungen im Hochbau», «Bestimmung des freien CaO resp. (C[OH]<sub>2</sub>) in Hydrauliten» u. a. m., waren überrascht — weil stofflich gar vom übrigen entfernt und aus dem Rahmen des SVMT fallend — darunter auch den Sonderdruck einer in «Hoch- und Tiefbau» erschienenen Abhandlung von Dr. L. Bendel über «Tunnelgeologie» vorzufinden<sup>1)</sup>.

Der Verfasser versucht, durch diese Arbeit alte und neuere Erkenntnisse aus der Literatur systematisch zusammenzufassen und sie einem grösseren Interessenskreise zugänglich zu machen. Das ist an und für sich anerkennenswert. Wessen Erfahrungen sich auf den Bau von rund 30 Tunneln und Stollen, worunter Lötschberg und Simplon, stützen, hat allerdings zur Tunnelliteratur eine kritischere, und in Fällen, wo die Ansichten auseinandergehen, auch eine positivere Einstellung, als sie da in Erscheinung tritt. Ich will jedoch auf Einzelheiten nicht eingreifen und äussere mich über die vorliegende Arbeit nur, weil ich über ihren Kernpunkt, d. h. über die Aufgaben des Geologen im Tunnelbau, eine grundsätzlich abweichende Ansicht verrete und sowohl als Dozent wie auch in Veröffentlichungen stets vertreten habe.

Dr. Bendel umschreibt diese Aufgaben folgendermassen: «Die Tunnelgeologie soll: 1. Auskunft geben über die geologischen Verhältnisse, die beim projektierten Tunnel oder Stollen angetroffen werden; 2. Angaben machen über die Einflüsse der Gesteinsbeschaffenheit auf den Bauvorgang; 3. Auskunft geben über die Einflüsse der Gesteinsbeschaffenheit auf die Baukosten, d. h. auf den Sprengstoffbedarf, die Zimmerung usw. 4. Die Einflüsse der geologischen Verhältnisse auf die Bauzeit sollen sich abschätzen lassen. 5. Während des Baus des Tunnels sollen die angetroffenen Ergebnisse gedeutet und bei Schwierigkeiten mit Wasser, Gas, Druckhaftigkeit usw. Ratschläge erteilt werden.»

Daraufhin werden die für den Tunnel- und Stollenbau wichtigsten geologischen Fragen erwähnt und die verschiedenen Stellungnahmen dazu, wie sie sich aus der Literatur ergeben, skizziert.

Dr. Bendel will mit seiner Arbeit ein besseres, wirksameres Zusammenarbeiten von Ingenieur und Geologen veranlassen. Darin ist er zu unterstützen, denn das Fehlen oder Ungenügen einer

<sup>1)</sup> Tunnelgeologie. Beitrag zur praktischen Ingenieur-Geologie. Von L. Bendel. Sonderdruck aus «Hoch- und Tiefbau» 1942/43. 27 S. mit 25 Abb. und 1 Tabelle. Zürich 1944. Verlag A.-G. Hoch- und Tiefbau, Beethovenstrasse 38. Preis kart. 4 Fr.