Ueber

Gebirgs-Eisenbahnen

mit besonderer Rücksicht

auf die

Ueberschreitung der Alpen

von

C. Willy

Ingenieur.

Separatabdruck aus dem Organ für die
Fortschritte des Eisenbahnwesens. V. Heft 1861.

BAr 31

31

Über Gebirgs-Eisenbahnen mit besonderer Rücksicht auf die Überschreitung der Alpen.

Vom Ingenieur C. Willy.

Mit Figuren.

I.

Allgemeine Betrachtungen.

§. 1.

In flachem Terrain oder Hügelland und selbst in Gebirgsgegenden, wo tiefliegende Thäler die Gebirgszüge durchbrechen, ihren Lauf in weiter Entwicklung fortsetzen und sich in Seitenthäler verzweigen, wo Ströme oder Flüsse sich in ausgedehnten Becken fortwinden und einzelne Glieder der Bergketten durch tiefe Einrisse getrennt sind, bietet in der Regel die Anlage von Eisenbahnen keine Schwierigkeiten, welche nicht mit den heutigen vervollkommneten Mitteln der Technik zu überwinden wären. So haben sich auch seit einer verhältnissmäßig kurzen Reihe von Jahren, die Eisenbahnnetze in sehr ausgedehntem Maaße entwickelt, theils um Verkehrplätze miteinander zu verbinden, theils um der Cultur in unwirthbare, entlegene Länderstrecken Bahn zu brechen. Und doch sehen wir mit einem Blick auf die Karte des europäischen Festlandes reiche, mächtige und hochcultivirte Länder, zwischen welchen auf die weite Entfernung von mehr als 900 Kilometer jede Bahnverbindung fehlt. Die Alpen bilden von Nizza bis nahe an die ungarische Grenze einen gewaltigen Querwall, von der Natur aus kolossalen Gebirgsmassen aufgebaut und dieser Querbau trennt jene Länder voneinander ab, ähnlich wie die Pyrenäen Spanien von Frankreich scheiden.

Auf der Süd- und Nordseite der Alpen haben sich weitverzweigte Schienennetze ausgebreitet. Große Bahnen durchziehen die üppigen Länderstriche Oberitaliens und knüpfen an die berühmten Seeplätze des adriatischen und mittelländischen Meeres, Venedig und Genua, an. Durch Italiens politische Wiedergeburt wird die hochaufstrebende Nation, unter dem Schutze einer weisen und starken Regierung, in Kurzem neue, großartige Resultate für die Verkehrsinteressen erzielen. Auf der Nordseite der Alpen ist man mit dem Bahnnetz in mehrfachen Zweigen bis an den Fuß der Alpenkette vorgedrungen, man suchte sich dem Süden zu nähern, ist aber machtlos stehen geblieben vor den Hindernissen, welche sich hier in den gewaltigsten Formen gegen die Verbindung aufthürmen.

Die Alpen bilden eine geschlossene Kette, deren einzelne Glieder in den mannigfaltigsten Bildungen und Stellungen nebeneinander gereiht sind und durch eine gemeinschaftliche Basis, über welcher sich die höheren Spitzen und Zinnen erheben, zusammenhängen. Die Höhe der Basis ist bestimmt durch die Höhe der Pässe, die an einigen Stellen die beidseitigen Abhänge der Kette miteinander verbinden. Es schwanken die verschiedenen Passhöhen innerhalb ziemlich enger Grenzen und sind im allgemeinen umso geringer je verwickelter die Struktur der umliegenden Gebirgsmassen ist, jedoch reicht die geringste dieser Höhen nahzu an die Schneeregion hinauf, indem sie nicht weniger als 5900 par. Fuß über dem Meeresspiegel liegt und hier steht das Hinderniss, welches der Verbindung der bis an die Abhänge der Alpen gezogenen Bahnlinien unausweichbar entgegentritt.

Die hohen Interessen, welche die Alpenbahnen, als Vermittlerinnen des internationalen Verkehrs für Italien, Frankreich, Deutschland und die Schweiz bieten, sind schon so vielfach erörtert worden und so allseitig in ihrer ganzen Geltung erkannt, daß wir uns im Folgenden ausschließlich der technischen Lösung des Problems zuwenden werden.

§. 2.

Bahnen, welche die einander entgegengesetzten Abhänge der Alpen miteinander verbinden sollen, können nur durch zwei Mittel geschaffen werden, und diese bestehen in der Anlage sehr langer Alpentunnels, welche die Basis der Bergkette durchbrechen und in der Überschreitung der Kette mit offener Bahn.

Am Mont-Cénis hat man das erstere Mittel gewählt und damit hat sich die Technik vor eine endlose Reihe der schwierigsten Räthsel gestellt. Die Durchbohrung eines Berges auf die enorme Länge von 12 700 Meter ist ein großartiges Experiment und übertrifft bei weitem alles, was je in dieser Art geleistet wurde. Die Erfahrungen, welche man im Tunnelbau besitzt, reichen hier nicht mehr zu; die Sphären, in denen dieselben gemacht wurden, sind zu enge, und die Übertragung der Schlüsse und Resultate aus diesen verhältnissmässig kleinen Kreisen in's Große, ist unsicher, gewagt und kann selbst gefährlich werden. Die Schwierigkeiten der Ausführung wachsen progressive mit der Länge des Tunnels, sobald letztere einen gewissen Werth erreicht hat und die unglücklichen Zufälle, denen man

ausgesetzt ist, sind unabsehbar. Zerklüftungen, Brüche, starke Wasserzuflüsse, böse Wetter ꝛc. können mit jedem Schritte weitern Vordringens, dem geregelten Fortschreiten der Arbeit Hindernisse entgegenstellen, die, wenn sie nicht das ganze Unternehmen in Frage stellen, doch die Vollendungszeit weit über alle Vorausberechnung hinaus in die Ferne rücken können.

Damit wollen wir indessen die Möglichkeit des Gelingens der Arbeiten am Mont-Cénis keineswegs bestreiten, noch ernstlich in Zweifel ziehen; die Construction und Anwendung der Bohrmaschinen, die Erzeugung und Transmission der comprimirten Luft, ihre Verwendung als Motor und Ventilator, die Regulirung der Temperatur im Tunnel, die Förderung der Massen ꝛc. geben ein glänzendes Zeugniß von den sinnreichen und großartigen Mitteln, durch welche bis heute am Mont-Cénis bedeutende Schwierigkeiten besiegt worden sind und man gewinnt hierdurch gewissermaßen eine Gewähr, dass sich für neue Hindernisse auch neue Hülfsmittel zu deren Überwindung finden werden. Wo Intelligenz und Ausdauer, Wissenschaft und Erfahrung so vereint zusammen wirken, da wird man, wenn die finanziellen Mittel nicht fehlen, nur vor dem Unbesiegbaren zurückweichen.

Wenn man also der einstigen Vollendung des großen Unternehmens am Mont-Cénis, obschon bis zur vollständigen Lösung des Problems noch ein weiter und mühesamer Weg zu überwinden ist, mit einem nicht geringen Maaß von Vertrauen entgegensehen darf, so möchte man anderseits fast zurückschrecken vor der Zeitdauer, die bis zur Erreichung des Zieles wird aufgewendet werden müssen. Vorausberechnungen kann man hier nur auf Annahmen stützen, die bei der allgemeinen Unsicherheit der Verhältnisse sehr irre leiten können. Nehmen wir für den Tunnelbetrieb mit den gewöhnlichen Mitteln durchschnittlich ein tägliches Vorrücken von 0,50 Meter für jede Angriffsstelle an, was nach den bisherigen Erfahrungen ziemlich dem Mittelwerth einer großen Anzahl ausgeführter Tunnel entspricht, so würde sich die Vollendungszeit eines Tunnel von 12 700 Meter Länge, mit nur zwei Angriffsstellen, wie dies beim Mont-Cénis der Fall ist, auf 35 Jahre berechnen.

Durch die Anwendung der neuen technischen Hülfsmittel hat man indessen am Mont-Cénis bedeutend günstigere Resultate erreicht und es sind besonders die Bohrmaschinen und die Verwendung comprimirter Luft, auf welche sich das rasche Vorschreiten der Arbeiten stützt. Ob man die Hoffnung, das tägliche Vorrücken an jeder der beiden Arbeitsstellen auf den enormen Werth von 3 Meter zu bringen, je erreichen wird, ist höchst zweifelhaft und man ist auch bis heute weit unter diesem Resultate zurückgeblieben. Bei der Beurtheilung des möglichen täglichen Fortschrittes sind besonders zwei Gesichtspunkte scharf im Auge zu behalten und zwar erstlich die Versorgung des Tunnels mit frischer Luft.

Ein tägliches Vordringen von 3 Meter verlangt eine Massenförderung von etwa 130 Cubikmeter pro 24 Stunden, wenn man den günstigen Fall voraussetzt, daß keine Ausmaurung des Tunnels erforderlich ist. Berechnet man nun die Quantität Pulver und Zündschnüre, welche zur Ablösung dieser Gesteinsmasse

durchschnittlich aufgewendet werden muß und daraus die Gasmenge, die sich beim Abbrennen derselben entwickelt; bestimmt man ferner das Luftquantum, welches innerhalb 24 Stunden durch die Grubenlichter und den Athmungsprozeß der Arbeiter aufgezehrt wird und berücksichtiget man den Umstand, daß die vollständige Mischung der irrespirablen Gase mit der atmosphärischen Luft nicht ohne Schwierigkeit und erst nach längerer Zeit erfolgt, die Diffusionswirkung also nur langsam vor sich geht, so findet man, daß alle 24 Stunden die enorme Menge von etwa 100 000 Cubikmeter frischer Luft künstlich in den Tunnel getrieben werden muß. Durch eine hinreichende Anzahl kräftiger Maschinen kann dieser Luftbedarf allerdings geliefert werden, er wird aber bei weitem nicht mehr ausreichen, wenn der Tunnel auf eine bedeutende Länge vorgetrieben ist. Besonders wenn sich im Verlaufe der Arbeit böse Wetter einstellen, kann der Luftbedarf so groß werden, daß sich die angewendeten Ventilationsapparate durchaus ungenügend erweisen und in den großartigsten Maßstab umgestaltet werden müssen. Immerhin wird die Ventilation bei einem täglichen Vordringen von 3 Meter die außerordentlichsten Schwierigkeiten bieten und so selbst wieder dem Fortschritt der Arbeiten nachtheilig entgegenwirken.

Der zweite Grund, welcher die Erreichung des gehofften Fortschrittes höchst unwahrscheinlich macht, liegt in den bergmännischen Arbeiten selbst. Man hat vielleicht die Schwierigkeiten, die hier entgegentreten, nicht genügend in Erwägung gezogen. Die Leistungen der Bohrmaschinen sind für die Raschheit des Fortganges der Arbeiten nicht allein entscheidend; wenn eine Maschine in homogenem Gestein pro Minute ein 9—11 Centimeter tiefes Loch schlägt, so giebt dieß noch keinen Maßstab für das tägliche Vorrücken. Die bergmännischen Arbeiten sind aus einer Anzahl verschiedener Manipulationen zusammengesetzt, von denen eine einzige, diejenige des Bohrens, durch die Maschinen verrichtet wird. Zuerst müssen die Stellen für die Bohrlöcher gewählt, die Maschinen müssen eingestellt und in Bewegung gesetzt werden. Während des Bohrens sind die Bohrlöcher mehrmals zu reinigen und die abgestumpften Bohrer gegen frisch geschärfte auszuwechseln. Bei hartem Gestein kann die letztere Operation 5—6 mal nothwendig werden bis das Bohrloch auf die erforderliche Tiefe gebracht ist. Dann sind das Pulver, die Zünder und der Besatz einzubringen; vor dem Anzünden der Minen müssen die Maschinen, die Luftleitungsröhren, Werkzeuge ꝛc. von der Stelle der Explosion entfernt werden; hat man das Explodiren der Minen abgewartet, so sind die gelösten Gesteinsmassen zu entfernen, lose noch hängende Massen wegzubrechen, die Arbeitsstellen müssen geräumt, die Maschinen wieder eingestellt und ins Werk gesetzt werden. Tritt nun der Fall ein, daß während des Bohrens die eine oder andere Maschine in Unordnung kommt, die Leitungsröhren Schaden leiden, daß die Bohrlöcher ausgetrocknet werden müssen oder einzelne Minen versagen, so kann hierdurch allein schon die Arbeit sehr bedeutend aufgehalten werden; da aber, wo die Zerklüftung des Gesteins einen Ausbau mit Holz nöthig macht, wo Stempel, Lang- und Querbalken das Tunnelprofil durchziehen, kann auf einen geregelten Betrieb mit den Maschinen durchaus nicht mehr gerechnet werden.

Aus diesen wenigen Andeutungen mag hervorgehen, daß die Anlage sehr langer Tunnel, bei welchen, der Höhe des Berges wegen, keine Schächte angelegt werden können, ein Unternehmen ist, bei dem man die Gewalt über die Vollendungszeit des Baues total aus der Hand verloren hat, abgesehen davon, daß im Verlaufe der Arbeit technische Schwierigkeiten eintreten können, welche die Vollendung überhaupt in Frage stellen. Es wird aber Niemand verkennen, daß gerade der Zeitgewinn ein Hauptmoment für alle industriellen Unternehmungen ist und man den dringenden Forderungen der Verkehrsinteressen nicht einen Bau gegenüber stellen darf, zu dessen Vollendung 15 und mehr Jahre erforderlich sind. Es handelt sich nicht darum zu beweisen, dass das technische Experiment, die Alpen zu durchbohren, gelingen kann, wenn man genug Zeit und Geld dazu aufwendet, sondern das Problem, welches zu lösen ist, besteht darin, die Mittel aufzufinden, durch welche mit dem geringsten Aufwand an Zeit und Geld, der Zweck, die entgegengesetzt liegenden Abhänge der Alpen mittelst eines Schienenweges miteinander zu verbinden, erreicht werden kann.

§. 3.

Als zweites Mittel zum Ziele zu gelangen, ist oben „die Überschreitung des Berges mit offener Bahn" bezeichnet worden.

Obschon auch hier der Ausführung große Schwierigkeiten entgegenstehen, so hat man sich doch immer mehr diesem Mittel, als dem rascher zum Ziele führenden, zugewendet. Über die Art und Weise wie die Alpenbahnen angelegt und nach welchem Systeme dieselben mit Betrieb gesetzt werden sollen, steht die Discussion noch offen. Es kommt hier hauptsächlich das Maximum der zulässigen Steigung in Betracht.

Zu den Bewegungswiderständen, welche sich der Fortschaffung eines Trains auf horizontaler Bahn entgegensetzen, kommt bei Steigungen noch die Überwindung der in die Richtung des Gefälles fallenden Componenten vom Gewichte des Trains hinzu. Beim Abwärtsfahren kommt diese Componente der Wirkung der Maschine zu Hülfe, so daß, wenn die Neigungsverhältnisse der Bahn derart sind, daß selbst auf den abwärtsgeneigten Strecken Dampfkraft erforderlich ist, oder wenigstens kein Theil der lebendigen Kraft des Zuges durch Bremsen zerstört werden muss, der beim Aufwärtsfahren aus der Steigung entspringende Verlust sich gegen den Gewinn bei der Thalfahrt compensirt und so die Steigung auf den totalen Arbeitsaufwand der Maschine ohne Einfluß bleibt. Man ist jedoch weit über diese Gränze $\left(\frac{1}{200}\right)$ hinausgegangen, weil in der Regel die Wahl der Steigung nicht willkürlich, sondern durch die Natur des Terrains bedingt ist. Wenn man noch vor 14 Jahren den Schluß gezogen hat, dass unter den damals bestehenden Verhältnissen zwischen Kraft und Last auf Eisenbahnen, bei

einer Steigung von $\frac{1}{100}$ die Anwendung stationärer Maschinen vortheilhafter sei als der Betrieb mit Locomotiven, so steht man heute vor ganz andern Resultaten. So ungünstig im Allgemeinen große Steigungen auf den Betrieb einer Bahn einwirken, ist man doch mit allen Anstrengungen darauf ausgegangen, dieselben immer zu vergrößern und es ist heute die Überwindung von $2\frac{1}{2}$ — 3 Prozent nichts Außerordentliches mehr.

Wo es sich, wie bei Gebirgsbahnen, darum handelt, eine gewisse Höhe zu überschreiten, da ist die Relation zwischen der Länge und Steigung der Bahn immer mehr oder weniger an die natürliche Steigung und Entwicklung des Terrains gebunden. Mit der Vermehrung der Steigung wird die Länge der Bahn reducirt, mit der Verminderung derselben muss letztere vergrößert werden. Hat man sich nun in engen, stark ansteigenden Thälern durchzuwinden, so wird man, wenn eine geringe Bahnneigung verlangt ist, im Allgemeinen nur mit der größten Schwierigkeit die Entwicklung für das Tracé finden und in den meisten Fällen sogar auf Unmöglichkeiten stoßen.

Nirgends aber stellt das Terrain der Anlage einer Bahn größere Hindernisse entgegen als da, wo es sich darum handelt, eine Bergkette quer zu überschreiten und nur enge, steile Thalwege zum Übergangspunkt führen. Wenn die Neigung des Thalweges das erlaubte Maximum der Bahnsteigung nicht übertrifft, so kann man denselben ohne Weiteres mit dem Tracé verfolgen, da aber, wo das Ansteigen des Thales jenes Maximum überschreitet, wird man gezwungen, die Länge der Bahn durch Curven und Querübersetzungen zu vergrößern und wenn selbst hierzu die Entwicklung nicht gefunden werden kann, Zickzackwindungen, wie solche von Negrelli und Bourdaloue zuerst vorgeschlagen worden sind, anzulegen. Durch letzteres Hülfsmittel wird allerdings, selbst unter sehr beschränkten Terrainverhältnissen, ein Tracé aufgefunden werden können, allein man darf des leichteren Baues wegen, die Rücksichten auf den Betrieb nicht aus dem Auge verlieren, zumal die Schwierigkeiten, welche man diesem entgegenstellt, sich mit jedem beförderten Zuge wiederholen, die Schwierigkeiten des Baues aber nur einmal zu überwinden sind. Man erkennt leicht, dass die sog. Zickzackwindungen, ein den Anforderungen eines zweckmäßigen, geregelten und vortheilhaften Betriebes durchaus ungenügender Nothbehelf sind. Bei den Wendepunkten der Curven müssen Kopfstationen angelegt werden, welche nicht nur bedeutende Anlagekosten, sondern auch eine besondere Bedienungsmannschaft für die Weichen erfordern, längern Aufenthalt verursachen und nothwendig machen, daß die Maschine, wenn sie an der Spitze des Zuges in die Station eingefahren ist, die ganze Strecke bis zur nächsten Station, hinten am Zuge wirken muß, dem Lokomotivführer also die nöthige Übersicht über die Geleise genommen und die Sicherheit gefährdet ist.

Um bei gewöhnlicher Steigung die nöthige Entwicklung für die Bahn zu erhalten sind auch kreisförmige Windungen vorgeschlagen worden, welche in einer

Schraubenlinie sich übereinander erheben, abwechselnd als kreisförmige Tunnel in den Berg eindringen und tangentiell an dessen Abhang wieder zu Tage treten. Diese Idee ist nicht ohne Werth, wenn es sich darum handelt, mit geringer Steigung in engen Thälern bedeutende Höhen zu ersteigen, jedoch bleiben die ungeheuren Anlagekosten und der Umstand zu bedenken, daß dieses Mittel eine sehr lange unterirdische Fahrt zur Folge haben würde. Überhaupt soll man nach unserer Ansicht nicht darauf ausgehen, mit Beibehaltung verhältnissmäßig geringer Steigungen, die Entwicklung für das Tracé möglich zu machen; alle Mittel, welche hier zu Gebote stehen, führen zu sehr kostspieligen Bauten oder wirken störend auf den Betrieb; es soll im Gegentheil alles versucht und aufgewendet werden, um die Anwendung größerer Steigungen zu ermöglichen. Dadurch wird die Länge der Bahn reducirt, der Bau wird viel einfacher und leichter, einer Menge schwieriger und kostspieliger Kunstbauten kann ausgewichen werden, indem man mit dem Tracé dem Profile der Thalwege so nahe wie möglich folgt und die Thalsohlen, selbst bei der zerklüftetsten und unregelmäßigsten Bildung der Abhänge, immer mehr oder weniger ausgeglichene Formen bilden. Durch die Verkürzung der Bahn werden nicht nur die Baukosten, sondern auch die Kosten der Unterhaltung vermindert und, was für Bahnen, die über so bedeutende Höhen führen, wie sie bei der Überschreitung der Alpen vorkommen, von ganz besonderem Interesse ist, es werden die Schwierigkeiten, welche aus den meteorologischen Einflüssen für den Betrieb entspringen, mit der Länge der Bahn im gleichen Verhältnisse reducirt. Es scheint daher ein Erforderniß, Mittel aufzufinden, durch welche große Steigungen leicht und sicher, mit geringen Betriebskosten überwunden werden können.

Das System der amerikanischen Gebirgsbahnen (z. B. Baltimore-Wheeling) bei welchen Rampen von $\frac{1}{18} - \frac{1}{15}$ Steigung mittelst Lokomotiven überstiegen werden, das Gewicht der Züge aber bloß 30—40 Tonnen und die Geschwindigkeit 8—12 engl. Meilen beträgt, kann den Ansprüchen einer Bahn, die den internationalen Verkehr über die Alpen vermitteln soll, nicht genügen, hier müssen großartigere Resultate erzielt und darum auch wirksamere und großartigere Mittel angewendet werden.

II.

Atmosphärisches System.

§. 4.

Man hat früher die atmosphärischen Eisenbahnen als besonders geeignet angesehen, große Steigungen und Curven mit kleinen Radien zuzulassen und es ist diesem System eine große Zukunft vorausgesagt worden. Damals waren die

Locomotiven noch kaum fähig, Steigungen von $\frac{1}{100}$ zu überschreiten und man war schon aus diesem Grunde bemüht, den atmosphärischen Bahnen in gebirgigen Gegenden, wo durch das Terrain größere Steigungen gefordert werden, Anwendung zu verschaffen. Es hat an schweren Bemühungen, Versuchen, vielen sinnreichen Constructionen und Verbesserungen nicht gefehlt, allein die in England, Irland und Frankreich zur Ausführung gekommenen Bahnen nach diesem System, haben den Erwartungen nicht entsprochen und sind, nachdem die Locomotiven durch Vergrößerung des Eigengewichtes und Kuppelung der Axen, für stärkere Rampen geeignet gemacht wurden, von diesen verdrängt worden. Die Schwierigkeiten, an welchen das atmosphärische System sozusagen gescheitert ist, sind sehr mannigfach. Die Complication der Construction, besonders der Längenklappen, die häufigen Störungen im Betrieb während des Winters, bei hohem Schneefall und großem Frost, die Reparaturen der Triebkolben, Röhren 2c. haben mit schwerem Gewicht gegen das System entschieden. Dazu kommt noch die Nothwendigkeit der Anlage stationärer Maschinen und hauptsächlich der Umstand, daß bei der geringsten Beschädigung der Längenklappen, des Kolbens oder der Triebröhre selbst, der Verkehr oft für längere Zeit unterbrochen wurde. Indessen ist über den Werth und die Anwendbarkeit der schönen Idee, welche dem atmosphärischen System zu Grunde liegt, nicht endgültig entschieden. Man ist bei diesem System weit über das Gebiet der bloßen Theorie hinausgetreten und hat an der Hand einer mehr als 12jährigen Erfahrung, Daten und Resultate gewonnen, die zu einem großen Theil für dasselbe sprechen. Wo es sich durch die gesteigerten Ansprüche und Forderungen des Verkehrs darum handelt, die Steigung der Rampen so sehr zu erhöhen, daß man mit den Berglocomotiven bisheriger Construction nicht mehr ausreicht und zu besondern Mitteln greifen muß, ist es wohl möglich, daß das atmosphärische System auf's Neue Verwerthung finden kann, und hier wollen wir die Gelegenheit benützen, um einen Weg anzudeuten, auf welchem bisherige Nachtheile des Systems umgangen und neue Vortheile erreicht werden könnten.

Wir setzen eine Rampe von sehr starker, ziemlich gleichförmiger Steigung voraus. Die Clegg'sche Röhre, welche nach der ganzen Länge der Rampe zwischen den Schienen gelegt ist, sei am obern Ende, mittelst eines aufgeschraubten Deckels, hermetisch geschlossen, das untere Ende dagegen sei offen. Denkt man sich den Zug am höchsten Punkte der Rampe stehend und mit dem Triebkolben der Röhre in Verbindung, so ist leicht einzusehen, daß beim Abwärtsfahren des Zuges, oberhalb des Kolbens ein Vacuum in der Röhre entsteht, weil der luftdicht schließende Kolben sich mit dem Zuge fortbewegen muß. Ist das untere Ende der Rampe erreicht, so wird die ganze Röhre luftleer sein und der Atmosphärendruck auf die untere Grundfläche des Triebkolbens wird für den nächsten, zu Berg fahrenden Train als Triebkraft dienen können. Die lebendige Kraft, die der Zug bei der Thalfahrt vermöge der Wirkung der Schwerkraft entwickelt, wird also auf diese Weise für die nächstfolgende Bergfahrt nutzbar gemacht. Diese Methode

verlangt die gleichzeitige Anwendung einer Locomotive. Weil nämlich der Atmosphärendruck auf den Kolben (wenn man auf die Differenz der Barometerstände am untern und obern Ende der Rampe keine Rücksicht nimmt) constant ist, das Gewicht der Züge aber wechselt, und auch die Neigung der Rampe nicht für die ganze Länge ein und dieselbe sein wird, so ist es erforderlich, daß die hieraus entspringenden Ungleichförmigkeiten in der Bewegung durch die Wirkung einer Locomotive ausgeglichen werden. Dann aber ist die Mitanwendung einer Locomotive schon deßwegen geboten, weil die von den verschiedenen Bewegungswiderständen herrührenden Kraftverluste wieder ersetzt werden müssen, indem man nicht im Stande sein wird, mittelst des Vacuums, welches durch einen zu Thal fahrenden Zug erzeugt worden ist, einen gleichschweren Zug aufwärts zu befördern. Faßt man die Widerstände, welche der Bewegung eines Zuges vermöge der Axenreibung, der Reibung der Räder auf den Schienen, der Wirkung des Windes und der Curven entgegentreten in einen Werth zusammen, so erhält man den Gesammtwiderstand auf horizontaler Bahn und kann denselben, in Uebereinstimmung mit den Erfahrungsresultaten $= \frac{1}{200}$ der zu bewegenden Gesammtlast setzen.

Ist daher: P das Gewicht des Zuges (in Kilogrammen) so wird folglich der Widerstand auf horizontaler Bahn:

$$W_1 = \frac{1}{200} P.$$

Der Widerstand, welcher durch die Steigung der Bahn verursacht wird, ist allgemein, wenn α den Neigungswinkel der Bahn gegen den Horizont bezeichnet:

$$W_2 = P \sin. \alpha$$

mithin ist der Gesammtwiderstand bei Ersteigung einer Rampe:

$$W = W_1 + W_2 = P \left(\frac{1}{200} + \sin. \alpha\right) \quad . \; . \; . \quad (1.)$$

Nennt man ferner:

d den Durchmesser der Triebröhre in Meter,

m den Grad der Luftverdünnung, so erhält man für den Atmosphärendruck auf den Triebkolben

$$K = 10\,336 \frac{d^2 \pi}{4} m \text{ Kilogramm.}$$

Sieht man vorerst von der Kolbenreibung ab, so wird für das Gleichgewicht:

$$W = K \text{ oder: } P \left(\frac{1}{200} + \sin. \alpha\right) = 10\,336 \frac{d^2 \pi}{4} m \text{ woraus}$$

$$P = \frac{10\,336 \; d^2 \pi \; m}{4 \left(\frac{1}{200} + \sin. \alpha\right)}.$$

Um durch ein Beispiel einen Anhaltpunkt zu gewinnen sei:

$d = 0.^m 50$

$m = \frac{8}{10}$

sin. $\alpha = \frac{1}{20}$ (5 Prozent Steigung) wornach man erhält:

P = 29514 Kilogramm = 29½ Tonne und wenn für die Kolbenreibung 10 Prozent in Abzug gebracht werden:

$$P = 26\tfrac{1}{2} \text{ Tonne.}$$

Hieraus ist ersichtlich, dass die Leistungsfähigkeit einer atmosphärischen Bahn bei einer Steigung von $\frac{1}{20}$, trotz dem bedeutenden Durchmesser der Treibröhre, ziemlich beschränkt ausfällt. Wird jedoch, wie wir schon anfangs vorausgesetzt haben, eine Berglokomotive, deren ganzes Gewicht auf Triebrädern ruht, zu Hülfe genommen, so kann die mechanische Leistung bedeutend erhöht werden, dergestalt, dass durch das Zusammenwirken beider Mittel, ein, selbst größeren Verkehrsverhältnissen genügender Effekt, zu erreichen ist.

Bezeichnet:

q das Gewicht der Lokomotive in Tonnen (ganz für die Adhäsion benützt),
f den Adhäsionskoëffizienten der Räder auf den Schienen,
α den Steigungswinkel der Bahn,

so erhält man für die größte Last, welche die Lokomotive über die Bahn aufwärts zu schaffen vermag, ohne dass ein Gleiten der Triebräder auf den Schienen eintritt:

$$Q = \frac{q\{1000\ f - (12 + 1000 \sin.\ \alpha)\}}{6 + 1000 \sin.\ \alpha} \text{ Tonnen} \quad . \quad . \quad (2.)$$

für q = 35

$$f = \frac{1}{6}$$

sin. $\alpha = \frac{1}{20}$ wird:

$$Q = \frac{35\left(1000\ \frac{1}{6} - (12 + 50)\right)}{6 + 50} = 65{,}4 \text{ Tonnen.}$$

Durch die gleichzeitige Wirkung der Lokomotive und des Triebkolbens der Clegg'schen Röhre kann daher eine Last:

L = Q + P = 65,4 + 26,5 = 92 Tonnen über die mit 5 Prozent ansteigende Rampe hinaufbewegt werden, was für Güterzüge etwa 28 Tonnen Tarra und 64 Tonnen Nutzlast ausmachen wird.

Die nöthige Zugkraft beim Abwärtsfahren wird, wenn man alle Größen in Kilogrammen ausdrückt:

$$K_1 = (L + q)\ \frac{1}{200} + \frac{11}{10}\ K - (L + q)\ \frac{1}{20}$$

$$= (92 + 35)\ \frac{1}{200} \cdot 1000 + \frac{11}{10}\ 1623 - (92 + 35)\ \frac{1}{20} \cdot 1000$$

$$= 2420 - 6350 = -\ 3930 \text{ Kilogramm}$$

und muss folglich, weil sie negativ ausfällt, durch Bremsen zerstört werden. Der

hieraus erwachsende Kraftverlust könnte durch Vergrößerung des Durchmessers der Triebröhre aufgehoben und dadurch der Dampfverbrauch der Lokomotive bei der Bergfahrt auf ein Minimum gebracht werden. In diesem Falle (nämlich für K_1 = Null) wäre dem Prinzipe „die bei der Thalfahrt, vermöge der Wirkung der Schwere entwickelte Kraft des Zuges, zu konserviren und zur späteren Bergfahrt zu benützen", so vollständig als nur immer möglich Genüge geleistet. —

So einfach und einleuchtend das angedeutete System der atmosphärischen Bahnen mit Lokomotivbetrieb an und für sich ist, würde es doch nicht rathsam sein, dasselbe für Bergbahnen von bedeutender Länge und lebhaftem Betrieb in Anwendung zu bringen. Die ökonomischen Vortheile entscheiden nicht allein, man hat auf einen sichern und geregelten Betrieb vor allem Rücksicht zu nehmen. Wir haben oben die Schwierigkeiten angeführt, mit welchen die Anwendung der Clegg'schen Röhre verbunden ist, und besonders auf die störenden Einflüsse der Witterung, den schwer herzustellenden hermetischen Schluss der Längenventile und namentlich den Umstand hingewiesen, dass durch jede Beschädigung des Triebapparates der ganze Verkehr gestört und möglicherweise für längere Zeit unterbrochen würde. Hauptsächlich da, wo die Temperaturunterschiede so abnorm auftreten wie in hochliegenden Gebirgen, würde man voraussichtlich mit der Clegg'schen Röhre auf die größten Hindernisse stoßen. Wenn es daher aus diesen und anderen, hier nicht näher bezeichneten Gründen, wenig räthlich erscheint, das atmosphärische System für sehr lange und über bedeutende Höhen führende Bahnen anzuwenden, so sind wir doch der Ansicht, dass dasselbe für kurze schiefe Ebenen von Werth und bestem Erfolge sein würde.

Das System, wie es hier vorgeschlagen wurde, lässt sich rücksichtlich des Betriebes, mit der Art, wie sonst die atmosphärischen Bahnen angewendet worden sind, durchaus nicht vergleichen. Erstlich fallen die stationären Maschinen, deren Anlage, Unterhaltung und Betrieb ungemeine Kosten verursachen, gänzlich weg, indem das Vacuum durch die kostenlose Kraft des zu thalfahrenden Zuges erzeugt wird; dann entsteht durch die Mitanwendung der Lokomotive der Vortheil, dass das Gewicht des zu bewegenden Zuges bedeutend vergrößert und die Geschwindigkeit leicht regulirt werden kann und endlich dürfte es bei dem neuen System mit vielweniger Schwierigkeiten verbunden sein, einen luftdichten Schluss der Längenventile herzustellen, weil die Verdünnung der Luft, resp. die Erzeugung des Vacuums, auf einmal, durch die Bewegung des Triebkolbens und nicht wie bei der Anwendung stationärer Maschinen, nur nach und nach bewirkt wird. Es ist leicht einzusehen, dass die Klappen, so lange die Luftverdünnung nur einen niederen Grad erreicht hat, der Überdruck von Außen also nur gering ist, nicht so dicht schließen, wie wenn im Innern der Röhre ein nahezu vollständiges Vacuum besteht.

Bezüglich der Längenklappen dürfte es wahrscheinlich vortheilhaft sein, mit komprimirter Luft gefüllte Guttapercha-Schläuche anzuwenden und dieselben gegen Außen zu schützen, was leicht durch einen röhrenförmigen Aufsatz auf der Triebröhre erreicht werden könnte. Überhaupt ist das System der verschiedensten Ver-

besserungen fähig und dürfte mit den angegebenen Modifikationen, für gewisse Terrain- und Verkehrsverhältnisse, ganz wesentliche Vortheile bieten.

III.

System Flachat.

§. 5.

Von einem anderen Gesichtspunkte aus hat der bekannte französische Ingenieur E. Flachat die Lösung des Problems der Gebirgsbahnen betrachtet und sein Projekt, in sehr ausführlicher Weise, in zwei Broschüren: „De la traversée des alpes par un chemin de fer“ auseinandergesetzt.

Flachat geht von dem wohlbegründeten und gewiss sehr richtigen Grundsatze aus, dass die Anwendung großer Steigungen (5—6 Prozent) für die Anlage von Alpenbahnen ein nothwendiges Erforderniss ist, indem hierdurch allein es möglich wird, den schwierigen und kostspieligen Bauten auszuweichen, die Länge der Bahn und damit die Kosten der Anlage und Unterhaltung, die Hülfsmittel zum Schutze gegen Lawinen, Erdschlipfe, Gebirgswasser ꝛc. und auch die Zeit der Überfahrt zu reduziren. Es sollen zur Überwindung der starken Steigungen keine neuen Hülfsmittel zur Anwendung kommen, sondern der Zweck soll blos durch Erweiterung und Modifikation der bisher bekannten und bewährten Mittel erreicht werden.

Die Last, welche auf einer Rampe aufwärts befördert werden kann, wird begrenzt durch die Adhäsion der Triebräder auf den Schienen und die Dampferzeugungsfähigkeit der Lokomotive. Um die Adhäsion zu steigern, hat man das Gewicht der Lokomotive vergrößert, die Achsen gekuppelt und selbst das Gewicht des Tenders durch Kuppelung in Adhäsionsgewicht umgewandelt; allein alle diese Mittel reichen für Rampen mit 5—6 Prozent Steigung nicht mehr aus. Geht man noch einen Schritt weiter und sucht das Gewicht des ganzen Zuges, also jedes einzelnen Wagens, für die Adhäsion zu gewinnen, so ist der Größe der zu fördernden Last keine andere Grenze gesetzt, als die Dampfmenge, welche die Lokomotive zu erzeugen vermag*). Die Transmission der Kraft, oder die Umwandlung sämmtlicher Achsen des Zuges in Triebachsen lässt sich mit Vortheil nur durch sehr elastische Körper, am besten durch den Dampf selber herstellen. Man denke sich einen Train,

*) Setzt man die Gleichung (2)

$$Q = q \left\{ \frac{1000\,f - (12 + 1000 \sin.\,\alpha)}{6 + 1000 \sin.\,\alpha} \right\} = \text{Null, so wird:}$$

$$1000\,f = 12 + 1000 \sin.\,\alpha \text{ und für } f = \frac{1}{6} \text{ folgt:}$$

$$\sin.\,\alpha = 0{,}154$$

d. h. wenn der Adhäsionskoeficient $^1/_6$ beträgt, so vermag eine Lokomotive, deren ganzes Gewicht für die Adhäsion benutzt ist, sich selbst über eine Rampe von $15^4/_{10}$ Prozent Steigung aufwärts zu bewegen.

dessen sämmtliche Wagen von beweglichen Achsengestellen getragen werden. Jedes der Achsengestelle ist mit kleinen Dampfzylindern versehen und diese empfangen den nöthigen Dampf von einem an der Spitze des Zuges befindlichen Kessel, durch eine Leitungsröhre, welche sich unter den Wagen fortzieht und mit den nöthigen Zweigröhren versehen ist. Von den Zylindern wird die Bewegung auf bekannte Weise, mittelst Triebstange und Kurbel an die Achsen übertragen, so dass also jede Achse des ganzen Zuges direkt durch die Dampfkraft in Umdrehung gesetzt wird. Dadurch hat man sozusagen jeden Wagen des Zuges in eine Lokomotive ohne Kessel umgewandelt und die Adhäsion auf ein Maximum gebracht.

Der Dampfkessel soll eine Heizfläche von 4—500 Quadratmeter erhalten; die Hauptleitungsröhre, die den Dampf vom Kessel aus den verschiedenen Zylindern längs des ganzen Zuges zuführt, besitzt an den Stellen, wo je zwei Wagen zusammenhängen die nöthige Biegsamkeit und besteht aus zwei konzentrischen, schmiedeisernen Röhren, von denen die innere den frischen Dampf enthält, die äußere den verbrauchten Dampf zum Blasrohr zurückleitet. Gegen die Abkühlung werden sowohl die Röhren, als auch die Zylinder mit schlechten Wärmeleitern umgeben. Um die Wagen für die Beschreibung scharfer Kurven (20—25 Meter Radius) geeignet zu machen, sollen die Räder entweder lose an den Achsen sitzen, (System Arnour) oder es soll die feste Verbindung der Räder mit den Achsen beibehalten, dagegen jedem Rade eine besondere Achse gegeben werden. Ferner werden Bremsen vorgeschlagen, die den halben Umfang der Räder umfassen und durch einen Schraubenmechanismus angezogen werden können; besonders aber wird auf die Bremsung mit Gegendampf gerechnet, weil sich diese, wenn die Bremskraft auf alle Räder des Zuges vertheilt werden kann, sehr vortheilhaft erweist, indem man durch dieses Mittel nicht nur die Geschwindigkeit vollkommen in die Gewalt bekömmt, sondern auch den Zug auf den stärksten Steigungen zum Stehen bringen, ja selbst rückwärts bewegen kann.

Dies ist die Grundidee, auf welche Flachat sein Projekt stützt. Ueber deren weitere Ausführung und Begründung verweisen wir auf die bereits angeführten Broschüren, in welchen die Frage sehr gründlich und umfassend, von den verschiedensten Gesichtspunkten aus, behandelt ist.

Die Beurtheilungen, welche das Projekt Flachat von Seite der Techniker erfahren hat, weichen sehr auseinander. Es bleibt unbestritten, dass die Anwendung stark steigender Rampen für die Anlage von Gebirgsbahnen und besonders für die Überschreitung der Alpen eine Hauptbedingung ist, dass man mit allen Mitteln die Erreichung dieses Zieles anstreben soll und dass das Lokomotivsystem, wenn es durch entsprechende Modifikationen für den verlangten Zweck geeignet gemacht werden kann, seiner Einfachheit und Sicherheit wegen, als das Vorzüglichste angesehen werden muss; jedoch sind die Ansichten darüber getheilt, ob das von Flachat angegebene Mittel allen Anforderungen entsprechen werde.

Die von Flachat verfolgte Idee ist keineswegs neu; schon vor einer Reihe von Jahren sind in dieser Richtung in Amerika Versuche gemacht worden, die

aber zu keinen günstigen Resultaten führten und als misslungen betrachtet werden müssen. Dies ist indessen durchaus nicht entscheidend; wir halten die Idee fest, weil sie prinzipiell richtig ist und auch für die Ausführung nichts Unmögliches oder Unüberwindliches in sich schließt. — Man hat eingewendet, Flachat habe die Adhäsion der Lokomotiven zu gering angeschlagen und sei desshalb in den Irrthum verfallen, ein so komplizirtes und kostspieliges System zu wählen; die Alpenbahnen können mit Steigungen von 5 Prozent angelegt werden, ohne die Anwendung eines besonderen mechanischen Hülfsmittels, die gewöhnlichen Lokomotiven mit gekuppelten Rädern genügen, um in jeder Jahreszeit einen sicheren und regelmäßigen Betrieb zu unterhalten. Diesem Urtheil entgegen wird von anderer Seite behauptet, dass in einer so hoch über dem Meere liegenden Region, in welcher der Winter beinahe 7 Monate dauere, bei einer Rampe von 5—6 Prozent Steigung auf einen geregelten Betrieb durchaus nicht gerechnet werden könne, da ja bei den ungünstigsten atmosphärischen Verhältnissen, die Lokomotiven, selbst auf horizontaler Bahn, kaum die nöthige Adhäsion finden. Auf diese Urtheile gedenken wir später zurückzukommen und machen hier auf einige andere Punkte aufmerksam.

Vor allem erkennt man, dass nach dem vorgeschlagenen System der Dampfverbrauch einen enormen Werth annimmt, besonders im Winter, wo die Temperatur in der Alpenregion auf 30—35 Grad unter Null herabsinkt und die Abkühlung des Dampfes in den langen Leitungsröhren, den vielen Zylindern und Zweigröhren, trotz allen Schutzmitteln, ungeheure Verluste herbeiführen muss. Die Effektverluste werden auch durch die große Anzahl der Bewegungsmaschinen, wie dieses System sie verlangt, bedeutend erhöht, weil bei jeder derselben Reibungswiderstände auftreten, die alle auf Kosten der Dampfkraft überwunden werden müssen. Die Dimensionen, welche Flachat für die Rost- und Heizfläche annimmt, dürften daher, so ungeheuer dieselben auch im Vergleich zu allen bis anhin ausgeführten Lokomotiven erscheinen mögen, wahrscheinlich eher zu klein als zu groß angeschlagen sein.

Der Bedarf an Brennmaterial wird ungemein groß ausfallen und die Betriebskosten sehr in die Höhe treiben, zumal selbst bei der Thalfahrt eine bedeutende Dampfmenge verlangt wird, indem die lebendige Kraft des Zuges durch Gegendampf zerstört werden soll. Dann aber ist es besonders die Komplikation des Betriebsmaterials, welche ernstliche Schwierigkeiten befürchten lässt. Man denke an die Beaufsichtigung und Instandhaltung eines so verzweigten Mechanismus, bei welchem sich die Zylinder, Kolben, Steurungen, Triebstangen 2c. mit jeder einzelnen Achse des ganzen Zuges wiederholen; — an die Gefahr, dass irgend ein Maschinentheil oder eine Leitungsröhre Schaden leiden kann und dadurch ernstliche Störungen veranlasst werden; man bedenke ferner die Umständlichkeiten, mit denen das An- und Abhängen der Wagen auf den Stationen verbunden ist und den Umstand, dass an den Endstationen der Bergbahn alle Güter umgeladen werden müssen, weil ja für den Betrieb derselben ein besonderes Transportmaterial vorausgesetzt wird, so hat man Gründe genug gefunden, die schwer-

wiegend gegen das System Flachat sprechen. In der That, Flachat hat das Mittel, die Adhäsion auf einen genügend hohen Werth zu bringen, um einen sehr theuren Preis erkauft und es ist die Frage, ob der Zweck nicht auf entsprechendere Weise und ohne die Zurücksetzung so wichtiger Rücksichten erreicht werden kann.

IV.

Neues System, mit Anwendung comprimirter, atmosphärischer Luft.

§. 6.

Sollen die Betriebskosten auf ein Minimum heruntergebracht werden, so muss man trachten, die Kraft, welche ein Zug beim Abwärtsfahren über eine Rampe, vermöge der Wirkung der Schwere entwickelt und welche bei allen bisher angewendeten und vorgeschlagenen Lokomotivsystemen durch Bremsen oder Gegendampf zerstört werden muss, für die Bergfahrt nutzbar zu machen. In diesem Prinzipe allein ist Heil zu suchen, wenn der Betrieb schiefer Ebenen nicht nur möglich, sondern auch rationell und ökonomisch vortheilhaft sein soll. Gerade da, wo es sich wie bei der Überschreitung der Alpen darum handelt, lange Rampen anzulegen, die von den entgegengesetzten Abhängen der Kette mit starkem und ziemlich gleichförmigem Gefälle gegeneinander ansteigen und sich am Übergängspunkte verbinden, wird der Vortheil, der aus der Anwendung des eben ausgesprochenen Grundsatzes erwächst, von ganz außerordentlicher Bedeutung. Wenn es, wie wir oben gesehen haben, nicht rathsam erscheint das, unter II. angeführte atmosphärische System für sehr ausgedehnte und hochliegende Gebirgsbahnen anzuwenden, so bleiben noch andere Mittel und Wege offen, um den Zweck zu erreichen; man hat nur dafür zu sorgen, dass der Bewegung des zu thalfahrenden Zuges ein nützlicher Widerstand entgegengesetzt und dadurch ein gewisses Quantum Kraft für die nächstfolgende Bergfahrt aufgespeichert wird. Hiezu scheint uns die Compression von atmosphärischer Luft das geeignetste Hülfsmittel. Die Luft ist ein Körper, welcher zu jeder Zeit und an allen Orten kostenlos disponibel steht und es bleibt blos übrig, einen entsprechenden Compressionsapparat zu construiren, denselben durch die Kraft des zu thalfahrenden Zuges in Bewegung zu setzen und ferner, besondere Reservoirs mitzuführen, die dazu dienen, die komprimirte Luft aufzunehmen, um sie später nach Bedarf wieder abzugeben. — Vor allem machen wir darauf aufmerksam, dieses System nicht mit demjenigen von Andraud und Jüllienne zu verwechseln; bei diesem handelt es sich darum, die Dampfkraft der Lokomotiven durch komprimirte Luft zu substituiren, indem diese letztere mit Hülfe stationärer Maschinen (diese können durch Wind- oder Wasserkraft in Bewegung gesetzt werden) erzeugt, in einem Reservoir mitgeführt und der Verbrauch stationsweise ersetzt werden soll, gerade so wie die Dampflokomotiven von Zeit zu Zeit mit Wasser und Brennmaterial versehen werden. Dagegen geht unser Vorschlag darauf hinaus: die Compression der Luft

durch die abwärts fahrenden Züge selbst vollführen zu lassen, die gepresste Luft in mitzuführende Reservoirs zu treiben und bei der Bergfahrt, **in Verbindung mit einer Dampflokomotive**, als Motor zu benützen.

Nach Gleichung (1) (Seite 189) ist der Gesammtwiderstand, welcher einer Last P bei Ersteigung einer Bahn, die unter dem Winkel α gegen den Horizont ansteigt, entgegensteht:

$$W = W_1 + W_2 = \frac{1}{200} P + \sin. \alpha P,$$ worin das erste Glied von den verschiedenen Reibungswiderständen, das zweite von der Steigung der Bahn herrührt.

Für $\sin. \alpha = \frac{1}{20}$ (5 Prozent Steigung) wird:

$$W = \frac{1}{200} P + \frac{1}{20} P = \frac{11}{200} P,$$ woraus hervorgeht, dass in diesem Falle der Widerstand der Steigung schon das Zehnfache der Reibungswiderstände beträgt. Für die Thalfahrt wird, weil die Wirkung der Schwere der Bewegung nicht mehr entgegentritt, sondern ihr zu Hülfe kommt, der Widerstand:

$$W_3 = W_1 - W_2 = \frac{1}{200} P - \frac{1}{20} P = -\frac{9}{200} P.$$

Sind daher bei der Bergfahrt $\frac{11}{200}$ P Kilogr. Zugkraft erforderlich, so können bei der Thalfahrt wieder $\frac{9}{200}$ P Kilogr. gewonnen, zur Compression der Luft aufgewendet und bei der Bergfahrt als Zugkraft benützt werden; der totale Kraftverlust für je eine Berg- und Thalfahrt zusammen beträgt mithin nur $\frac{2}{200}$ P oder etwa 18 Prozent von der Kraft, die für die Bergfahrt aufzuwenden ist.

Hierbei ist freilich auf die Reibungswiderstände der Kompressionsapparate und allfällige Spannungsverluste der gepressten Luft keine Rücksicht genommen; darüber kann auch nicht geurtheilt werden, bevor der Mechanismus, durch welchen die Kompression vollführt werden soll, näher bezeichnet ist, aber trotzdem kann man schon die großen Vortheile einsehen, welche durch die Anwendung des angegebenen Prinzipes zu erreichen sind.

§. 7.

Die allgemeine Anordnung der Züge soll nach dem neuen Systeme folgende sein:

An der Spitze steht eine, für die Befahrung scharfer Curven geeignet konstruirte Lokomotive sammt Tender, wobei vorausgesetzt wird, dass das ganze Gewicht auf Triebrädern ruht, also durch Kuppelung das Gewicht von Lokomotive und Tender in Adhäsionsgewicht umgewandelt ist. Diese Voraussetzung schließt nichts Neues in sich, sie wird durch eine Anzahl ausgeführter und bewährter Konstruktionen erfüllt. Unmittelbar hinter der Lokomotive befindet sich ein besonders konstruirter

Wagen, welcher ausschließlich dazu dient die Reservoirs für die komprimirte Luft zu tragen und durch ein Kuppeleisen mit der Lokomotive zusammenhängt. Hierauf folgen die übrigen Bestandtheile des Zuges, die als gewöhnliche, auf Laufrädern ruhende und mit beweglichen Untergestellen versehene Transportwagen vorausgesetzt werden. Nach welchem Systeme immer die Lokomotive gebaut sein mag, eine Eigenthümlichkeit muss sie für unsern Fall besitzen und diese besteht darin, dass die Dampfzylinder mit besondern Luftpresszylindern in Verbindung stehen, deren Kolbenmechanismus durch eine Transmission mit den Triebachsen verbunden ist. Wie diese Luftpresszylinder angebracht und auf welche Weise die Transmission vermittelt werden soll, wird im Allgemeinen von der Disposition und Konstruktion der Lokomotive abhängen; es soll später hierauf zurückgekommen werden. Der Wagen, auf welchem die Reservoirs ruhen, ist in ähnlicher Weise wie die Lokomotive mit 2 Dampf- und 2 Luftpresszylindern versehen, deren Kolbenstangen mit den Achsen zusammenhängen, sodass also auch das Gewicht dieses Wagens für die Adhäsion gewonnen ist. Das Längenprofil der Bahn soll aus zwei mit möglichst gleichförmigem Gefälle angelegten, von beiden Abhängen der quer zu überschreitenden Bergkette gegen einander ansteigenden Rampen bestehen. Am Übergangspunkte seien beide Rampen durch eine horizontale oder wenig geneigte Strecke miteinander verbunden. Diese Annahmen sind jedoch für das in Sprache liegende System durchaus keine Bedingung, sie sollen blos dazu dienen, um ein mit den vorkommenden Fällen im Allgemeinen übereinstimmendes Bild zu gewinnen.

Ist der Train im Abwärtsfahren begriffen, so sind die Luftpressapparate, weil sie mit den Triebachsen in Verbindung stehen, in Thätigkeit. Es wird mit jedem Kolbenhub ein gewisses Quantum Luft von einer Atmosphäre Spannung auf ein kleineres Volumen zusammengepresst und in die Reservoirs getrieben. Der mechanische Arbeitsaufwand, welcher hiezu erforderlich ist und natürlich von dem Raumeinhalt der Compressionszylinder und dem Spannungsgrad der komprimirten Luft abhängt, geschieht auf Kosten der Kraft, die durch die Wirkung der relativen Schwere des abwärtsgehenden Zuges entwickelt wird. Je nachdem der Widerstand der Presskolben größer oder kleiner wird, muss die Geschwindigkeit des Zuges (gleiche Steigung der Bahn vorausgesetzt) ab- oder zunehmen und wenn durch einen Regulator die Größe dieses Widerstandes verändert werden kann, so wird man auch im Stande sein die Geschwindigkeit des Zuges zu reguliren. Ist der Zug unten an der Rampe angekommen, so sind die Reservoirs mit komprimirter Luft gefüllt und es kann diese bei der folgenden Bergfahrt als Motor verwendet werden.

Nach Gleichung (2) (Seite 190) ist die größte Last, welche eine Lokomotive vom Gewichte q (ganz in Adhäsionsgewicht umgewandelt) über eine Rampe von der Neigung α aufwärts zu bewegen vermag:

$$Q = \frac{q \{1000 f - (12 + 1000 \sin. \alpha)\}}{6 + 1000 \sin. \alpha}.$$

In dieser Formel ist angenommen, dass jede Tonne des an der Lokomotive angehängten Zuges, mit Einschluss des Luftwiderstandes und bei gewöhnlicher Fahr-

geschwindigkeit, auf horizontaler Bahn einen Widerstand von 6 Kilogramm und jede Tonne vom Gewicht der Lokomotive selbst, inklusive der Reibung der Maschinentheile, einen solchen von 12 Kilogramm verursacht — eine Annahme mit der man selbst für sehr ungünstige Verhältnisse ausreicht.

Um ein Beispiel zu haben, setzen wir das Gewicht der Lokomotive = 40 Tonnen, dasjenige des Luftwagens = 25 Tonnen; folglich wird, indem auch das letztere, nach der frühern Erörterung ganz für die Adhäsion benützt ist:

$$q = 40 + 25 = 65 \text{ Tonnen; ferner sei wie oben:}$$

$$f = \frac{1}{6} \text{ und } \sin.\ \alpha = \frac{1}{20} \text{ also wird:}$$

$$Q = 65 \left\{ \frac{1000\frac{1}{6} - (12 + 1000\frac{1}{20})}{6 + 1000\frac{1}{20}} \right\} = 121\tfrac{1}{2} \text{ Tonne Brutto,}$$

oder etwa 85 Tonnen Nutzlast.

Man sieht hieraus, dass ein Adhäsionsgewicht von 65 Tonnen schon genügt, um eine ziemlich bedeutende Last über die Rampe von 5 Prozent Steigung aufwärts zubewegen, wenn der Adhäsionskoeffizient $\frac{1}{6}$ beträgt. Sollten die Verkehrsverhältnisse die Beförderung schwererer Züge als 121 Tonnen verlangen, so hätte man den Werth von q zu vergrößern. Übrigens wird es in mancher Beziehung vortheilhafter sein, das Gewicht der Züge nicht zu sehr zu erhöhen, dagegen ihre Anzahl nach Bedarf zu vermehren, was wenigstens für Güterzüge ohne alle Schwierigkeit geschehen kann.

Wir behalten die im obigen Beispiel enthaltenen Werthe bei und bestimmen die Größe der Zugkraft für die Berg- und Thalfahrt.

Mit Berücksichtigung der Reibung der Maschinentheile erhält man hierfür:

$$Z = 6\ Q + 12 . q \pm 1000\ (Q + q)\ \sin.\ \alpha.$$

$$= 6 . 121 + 12 . 65 \pm 1000\ (121 + 65)\ \frac{1}{20} = 1506 \pm 9300 \text{ Kilg.}$$

wobei das positive Zeichen für die Fahrt aufwärts, das negative für die Fahrt abwärts gilt; mithin wird:

$$Z = 1506 + 9300 = 10806 \text{ Kilg. für die Bergfahrt und}$$

$$Z_1 = 1506 - 9300 = -\ 7794 \text{ Kilg. für die Thalfahrt.}$$

Dieser letztere Werth für Z_1 kann, weil er negativ ausfällt, für die Luftkompression aufgewendet werden und beträgt, wie man sieht etwa 72 Prozent von derjenigen Kraft, welche zur Bergfahrt erforderlich ist.

§. 8.

Um für einen bestimmten Fall die Größe der Luftreservoirs berechnen zu können, müssen Annahmen gemacht werden über den Grad der Kompression und die Länge der Rampen. Wird das letzte Beispiel beibehalten und die Länge der Rampe S = 20.000 Meter (20 Kilometer) gesetzt, so erhält man für die theoretische Arbeitsleistung des Zugs während der ganzen Thalfahrt:

$$A = Z_1\ S = 7794 . 20\,000 = 155\,880\,000 \text{ Kilogrammmeter.}$$

Bewegt sich der Zug mit einer Geschwindigkeit von 5 Meter, so wird diese Arbeitsleistung in $\frac{20000}{5} = 4000$ Sekunden oder 1 Stunde 7 Minuten verrichtet und man erhält für die Leistung pro Sekunde 38 970 Kilogrammmeter.

Wird von der Temperaturerhöhung der Luft, die während der Kompression eintritt abgesehen, so erhält man, mit Zugrundelegung des Mariotte'schen Gesetzes, für die mechanische Arbeit, welche angewendet werden muß, um eine Luftmasse vom Volumen V und der Spannung p durch Kompression auf das Volumen V_1 und der Spannung $p_1 = \frac{V}{V_1}\ p$ zu bringen:

$$L = Vp \text{ log. nat.} \left(\frac{V}{V_1}\right) \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (3)$$

Soll die Kompression auf n Atmosphären getrieben werden so wird für unsern Fall: $n\ V_1 = V$ (weil p = 1 Atmosp.) und:

$$L = n\ V_1\ p \text{ log. nat. } n\ , \text{ daher:}$$

$$V_1 = \frac{L}{n\ p \text{ log. nat } n} = \text{dem gesuchten Volumen der Reservoirs.}$$

Da p = 1 Atmosp. = 10 336 Kilg. pro Quadratmeter und log. nat. n = 2,3026 log. n ist, so kann man auch schreiben:

$$V_1 = \frac{L}{n . 10\,336 . 2{,}3026 \text{ log. } n} = \frac{L}{23\,800 . n . \text{log. } n} \text{ Cub. meter.}$$

Setzen wir n = 50 Atmosphären so wird, da nach dem gewählten Beispiel A = L = 155 880 000 ist:

$$V_1 = \frac{155\,880\,000}{23\,800 . 50 . \text{log. } 50} = 77 \text{ Cub. meter.}$$

für n = 60 wird:

$V_1 \doteq 61$ Cub. meter d. h. wenn ein Zug, dessen Gesammtgewicht (Q + q), 186 Tonnen beträgt, sich über eine Rampe von 5 Prozent Gefälle und 20 Kilometer Länge herunterbewegt, so ist die Kraft, welche derselbe vermöge der Wirkung der relativen Schwere entwickelt im Stande, eine Luftmasse von 60 × 61 = 3660 Cub. meter von einer Atmosphäre Spannung, auf das Volumen von 61 Cub. meter und die Spannung von 60 Atmosphäre zusammenzupressen und verrichtet dabei eine mechanische Leistung von 155 880 000 Kilometer. Umgekehrt wird, wenn 61 Cub. meter Luft von 60 Atmosphäre Spannung durch Ausdehnung in die Spannung von einer Atmosphäre übergehen, die mechanische Arbeit von 155 880 000 Kilometer frei und kann für die Bergfahrt verwendet werden. Aus den für V_1 gefundenen Werthen ist ersichtlich, das für unsere Annahmen, trotz des hohen Kompressionsgrades der vorausgesetzt wurde, das Gesammtvolumen der Reservoirs so groß ausfällt, daß es kaum möglich sein würde denselben auf einem einzigen Wagen mitzuführen. Umfassende praktische Versuche müssen feststellen, wo die Grenze der größten zulässigen Spannung liegt und welche Form, Größe und Konstruktion der einzelnen Reservoirs allen

Bedingungen am besten entspricht. Am zweckmäßigsten wird es wohl sein, ein System ziemlich enger, 8—10 Meter langer, cylindrischer Röhren aus Schmiedeisen anzuwenden. Diese Röhren müssen miteinander in Verbindung stehen und könnten zum Theil auf dem Tender Platz finden, insofern der Luftwagen nicht Raum genug bietet um das ganze System aufzunehmen. — Durch eine sehr einfache Konstruktion kann die Spannung, der die Röhrenwandungen zu widerstehen haben, auf die Hälfte der Spannung, welche die komprimirte Luft besitzt, reducirt werden. Werden nämlich zwei Röhren von nahezu gleichem Durchmesser in einandergeschoben, sodass sich ein sehr enger konzentrischer Raum zwischen beiden bildet und befindet sich in der innern Röhre Luft von n Atmosphären, hingegen im Raum zwischen beiden solche von $\frac{1}{2}$ n Atmosphären Spannung, so ist klar, daß vermöge des Gegendrucks die Wandungen der innern und äußern Röhre nur mit $\frac{1}{2}$ n Atmosphäre in Anspruch genommen werden. Diese Methode kann ohne Zweifel mit großem Vortheile angewendet werden; wenn dabei auch keine große Materialersparniß eintreten wird, so erreicht man doch größere Sicherheit und ist im Stande sehr hohe Spannungen zuzulassen.

Theoretisch würden kugelförmige Reservoirs die größten Vortheile bieten, es fragt sich nur, ob sich nicht der Ausführung bedeutende praktische Schwierigkeiten entgegenstellen würden.

Wo wegen der großen Länge und Steigerung der Rampe und der Beförderung sehr schwerer Züge, des Volumen der Reservoirs zu groß ausfällt, kann man zu dem sehr einfachen Mittel Zuflucht nehmen, die Rampe durch annähernd gleichweit auseinander liegende Stationen in Sectionen abzutheilen. Bei der Thalfahrt wären dann die gefüllten Reservoirs gegen leere und bei der Bergfahrt leere gegen gefüllte an jeder Station auszuwechseln, resp. die Luftwagen selbst, auf Weichen zu verstellen.

§. 9.

Nachdem wir gesehen haben, mit welcher Kraft die komprimirte Luft erzeugt und wie dieselbe in Reservoirs mitgeführt werden kann, bleibt nun zu zeigen übrig, durch welchern Apparat die Kompression verrichtet und auf welche Weise die gepresste Luft bei der Bergfahrt als Motor verwendet werden soll.

Von allen zu überwindenden Schwierigkeiten ist hier wohl diejenige am auffallendsten, welche von der Variabilität des Wiederstandes der Presskolben herrührt. Dieser Wiederstand wird am Anfang der Bewegung, wenn die Luft erst auf einen geringen Spannungsgrad zusammengepresst ist, sehr klein sein und immer zunehmen, bis der Zug unten an der Rampe angekommen und die Kompression auf den höchsten zulässigen Werth gebracht ist.

Da nun aber die Kraft, durch welche die Kompression erzeugt wird, bei annähernd gleichförmigem Gefälle der Rampe und gleichmäßiger Geschwindigkeit des Zuges nahezu konstant ist, so muß ein Mittel aufgefunden werden, um die Ungleichheit des Widerstandes zu vermeiden und diesen so in die Gewalt zu bekom-

men, daß die Geschwindigkeit des Zuges nach Wunsch regulirt werden kann. Wollte man, um diesen Zweck zu erreichen, die Hubhöhe der Presskolben variabel machen, so würde man auf einen sehr komplicirten Mechanismus stoßen, dessen Handhabung selbst wieder mit bedeutenden Unständlichkeiten verknüpft wäre. Sind aber mehrere Kompressionscylinder, die gleiche Hubhöhe und verschiedene Durchmesser haben mit einander in Verbindung gebracht nnd ist die Einrichtung getroffen, dass der größte dieser Zylinder mit der freien Luft, der kleinste hingegen mit den Reservoirs in Komunication steht, so kann man es leicht dahin bringen, daß bei jedem Kolbenhub ein Volumen Luft, welches gleich ist dem Volumen des größten Zylinders auf das Volumen des kleinsten Zylinders zusammengepreßt und von diesem aus in die Reservoirs getrieben wird.

Da die Pressungen sich umgekehrt wie die Volumina verhalten, so wird wenn der größte Zylinder n mal größer ist als der kleinste, die Luft in letzterem auf n Atmosphäre comprimirt.

Weil also mit jedem Kolbenhub ein gewisses, konstantes Luftvolumen (gleich den Inhalt des größten Zylinders) auf eine bestimmte Spannung (n Atmosphären) komprimirt wird, so muss auch die Arbeitsleistung des Kompressionsapparates für die ganze Dauer der Bewegung constant sein und man hat die scheinbare Schwierigkeit wegen der Ungleichförmigkeit des Widerstandes, auf einfache Weise überwunden.

In Fig. 1 ist ein solcher Apparat mit Anwendung von 3 Zylindern im Durchschnitt skizzirt. Die Kolbenstangen sind durch, um 120 Grad verstellte Kurbeln mit ein und derselben Achse verbunden.

Bei A^1 tritt die äußere Luft abwechselnd über und unter den Kolben des ersten Zylinders und bei B wird die komprimirte Luft aus dem kleinsten Zylinder in die Reservoirs geführt. Die Wirkungsweise des Apparates geht aus der Zeichnung so deutlich hervor, dass eine besondere Erklärung überflüssig ist. Die Ventile müssen sehr solid konstruirt sein und zwar mit Rücksicht darauf, ein rasches Ventilspiel, scharfen Abschluß und sanftes Auf- und Niederbewegen zu erlangen. Die Querschnitte zum Einsaugen der Luft bei A und A^1 müssen groß gemacht werden und können um schwere Ventile zu vermeiden aus mehreren kleinen Öffnungen, wovon jede mit einem Ventil versehen ist gebildet sein. Über den Saugventilen ist eine Art Schieber oder irgend ein passender Mechanismus anzubringen, welcher dazu dient den Luftzutritt zum Saugzylinder abzuschließen, bevor der Kolben seinen Hub vollendet hat, für den Fall, daß die disponible Kraft nicht hinreichen sollte, mit jedem Kolbenhub ein Volumen Luft zu komprimiren, welches dem Volumen des ersten Zylinders gleich ist.

Wird z. B. der Luftzutritt abgeschlossen, so bald der Kolben den halben Hub vollendet hat, so wird auch der Effekt der Maschine auf die Hälfte heruntersinken und man hat auf diese Weise ein Mittel in der Hand, Widerstand und Kraft in jedem Moment einander anzupassen. Die Kolben sind in ähnlicher Weise, wie die Gebläsekolben zu konstruiren, mit Rücksicht auf die überaus hohen Pres-

sungen, denen sie hier ausgesetzt sind. Durch die Anwendung dreier Kurbeln wird der Ungleichförmigkeitsgrad des Apparates sehr vermindert und dadurch der Nutzeffekt desselben erhöht. Die Dimensionen des ersten und dritten Zylinders bestimmen sich aus der Größe der disponiblen Kraft und der Anzahl Atmosphären auf welche die Kompression getrieben werden soll; dem mittleren Zylinder hat man einen solchen Durchmesser zu geben, dass die mechanische Arbeit der drei Kolben gleich groß ausfällt.

In Verbindung mit einer stationären Maschine würde dieser Apparat ohne Zweifel gute Dienste leisten; in Anwendung auf Lokomotiven hätte man die Triebachse mit einer dritten Kurbel zu versehen, oder wenn dieses aus konstruktiven Gründen vermieden werden will, könnte der mittlere Zylinder entweder ganz weggelassen oder so angeordnet werden, daß dessen Kolbenstange mit derjenigen des ersten oder dritten Zylinders an ein und denselben Krummzapfen führt.

Kompendiöser fällt der Apparat aus, wenn man die 3 Zylinder statt nebeneinander, ineinander legt, wie in Fig. 2 angedeutet ist. Die Kolbenstange des Kolbens K, der sich im Zylinder A bewegt, ist hohl und bildet den zweiten Zylinder B; der 3. Zylinder C steht mittelst einer Leitungsröhre R mit den Reservoirs in Verbindung. Bewegt sich der Kolben nach der Richtung des Pfeiles, so wird er, am Ende seines Laufes angekommen, das Luftvolumen, welches in A enthalten war, auf das Volumen des Zylinders B zusammengepresst haben, weil während dieser Bewegung die Ventile v_1 geschlossen sind, v_2 sich aber öffnet, bevor der Kolben seinen Hub vollendet hat. Geht der Kolben nach der andern Richtung, so wird die äußere Luft durch v_1 in den ersten Zylinder treten und die im Raume B befindliche, bereits auf einen gewissen Grad komprimirte Luft, wird durch das Ventil v_3 in den Zylinder C und von hier in die Reservoirs getrieben. Dieser Apparat ist also einfach wirkend, weil der Kolben einen Doppelhub durchlaufen muss, um ein Volumen Luft, welches dem Inhalt des Saugzylinders A gleich ist, auf den gewünschten Grad zusammenzupressen.

Werden die Volumina der Zylinder A, B, C beziehungsweise mit V_1 V_2 V_3 und die entsprechenden Spannungen p_1 p_2 p_3 bezeichnet, so hat man für die mechanische Arbeit, die aufzuwenden nöthig ist, um die Luftmasse vom Volumen V_1 und der Spannung p_1 (1. Atmosphäre) auf das Volumen V_2 und die Spannung $_2$ zubringen nach Gleichung (3)

$$L = V_1\ p_1 \text{ log. nat.} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

und diese Arbeit wird verrichtet, während dem der Kolben seinen Hub in der Richtung des Pfeiles vollführt. Bei der rückgängigen Bewegung des Kolbens wird das Volumen V_2 von der Spannung p_2 auf das Volumen V_3 und die Spannung p_3 komprimirt, wozu die mechanische Arbeit:

$$L^1 = V_2\ p_2 \text{ log. nat.} \left(\frac{V_2}{V_3}\right) \text{ aufgewendet werden muss.}$$

Damit die Maschine gleichmäßig arbeitet, müssen diese beiden Leistungen einander gleich sein, daher:

$$L = L^1 \text{ oder: } V_1\ p_1 \text{ log. nat.} \left(\frac{V_1}{V_2}\right) = V_2\ p_2 \text{ log. nat.} \left(\frac{V_2}{V_3}\right).$$

Ist der verlangte Kompressionsgrad = n Atmosphären, so wird:

$$V_3 = \frac{V_1\ p_1}{n} \text{ also: } V_1\ p_1 \text{ log. nat.} \left(\frac{V_1}{V_2}\right) = V_2\ p_2 \text{ log. nat.} \left(\frac{n\ V_2}{V_1\ p_1}\right)$$

und da für unseren Fall $p_1 = 1$ Atmosph. und $V_1\ p_1 = V_2\ p_2$ ist, so folgt für das Volumen des mittleren Zylinders:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{1}{n}} \text{ und die entsprechende Spannung}$$

$$p_2 = \sqrt{n} \text{ Atmosphären.}$$

Der Apparat (Fig. 2) ist sehr einfach und kompendiös; er enthält einen einzigen Kolben, wodurch die Reibungswiderstände geringer ausfallen und man hat nur dafür zu sorgen, dass der schädliche Raum im Zylinder A möglichst klein wird und die Liderung des Kolbens und der Stopfbüchse dicht schließen.

Rücksichtlich der Anordnung der Luftpressen auf der Lokomotive und dem Luftwagen hat man vor allem dafür zu sorgen, dass die Kraftübertragung von der Triebachse an die Luftpresskolben solid und einfach ausfällt. Am besten wird der Zweck zu erreichen sein, wenn man die Triebstangen, welche beim Aufwärtsfahren die Kraft der Dampfkolben auf die Triebachse übertragen, dazu benutzt, um bei der Thalfahrt die Luftpresskolben in Bewegung zu setzen. Hiezu darf man blos die Kolbenstange des Dampfzylinders rückwärts verlängern, durch eine zweite Stopfbüchse aus dem Zylinder führen und unmittelbar mit dem Kolben der Luftpresse in Verbindung bringen, sodass Dampf- und Luftkolben eine gemeinschaftliche Kolbenstange haben (Fig. 3), geradeso, wie bei vielen Lokomotiven der Kolben der Speisepumpe direct mit dem Dampfkolben verbunden ist.

§. 10.

In Fig. 3 ist ein Luftkompressionsapparat im Längendurchschnitt dargestellt, dessen Konstruktion von den bereits besprochenen ganz wesentlich verschieden ist. Um der Schwierigkeit, die Kolben dicht zu erhalten und die Abnutzung derselben bei der trockenen Reibung auszuweichen, ist hier ein sogenannter Bramahkolben angewendet. Dieser Kolben A ist massiv, genau abgedreht und bewegt sich in dem horizontalen Zylinder B, zwischen der Liderung a, a, ohne die Wände des Zylinders zu berühren. Der Rauminhalt eines jeden der beiden vertikalen Aufsätze D D^1 ist gleich dem Raum, welchen der Kolben während eines Schubes beschreibt. Der Zylinder B und der eine der vertikalen Aufsätze sind mit Wasser gefüllt, sodass der Kolben stets untergetaucht bleibt. v_1 v_3 sind die Einlassventile für die freie, v_2 v_4 die Auslassventile für die komprimirte Luft. Hat der Kolben seinen Schub nach der Richtung des Pfeiles vollendet, so ist der Raum D mit Luft von 1 Atmosphäre Spannung, hingegen der Raum D^1 mit Wasser gefüllt.

Beim Rückgang des Kolbens steigt das Wasser in den Raum D, die darin befindliche Luft wird, weil v_1 sich schließt, zusammengepreßt, hebt das Ventil v_2 und wird durch die Röhre E in die Reservoirs getrieben. Auf der anderen Seite schließt sich das Auslassventil v_4 und das Ventil v_3 öffnet sich; das Wasser tritt aus dem Raume D^1 in den horizontalen Zylinder B zurück und es füllt sich D^1 mit atmosphärischer Luft. Dieses Spiel wiederholt sich mit jedem Kolbenschub, sodass also, so oft der Kolben einen Schub vollendet, eine Luftmasse komprimirt wird, deren Volumen gleich ist, dem vom Kolben durchlaufenen Raume. Da, besonders bei raschem Kolbenlauf, es unvermeidlich ist, daß mit jedem Hube eine gewisse, kleine Wassermenge mit der komprimirten Luft durch die Auslaßventile übergerissen wird, so ist Fürsorge zu treffen, dass dieser Verlust (wegen des schädlichen Raumes) wieder ersetzt wird und das Wasser sich nicht zu sehr in der Röhre E anhäufen kann, Zu diesem Zwecke ist bei FF ein kleines, oben mit einem Ventil versehenes Röhrchen eingesetzt; das Ventil ist mit einem Schwimmer (kleine, hohle Metallkugel) in steifer Verbindung. Wenn nun z. B. das Wasser im Raume H in der Höhe steht, wie auf der linken Seite des Apparates angedeutet ist, so wird das Ventil auf seinem Sitze aufruhen und den Abfluß des Wassers nach dem Raume D hindern. Wird nun aber beim nächsten Kolbenschub die Luft in D komprimirt, so wird sich nicht nur das Auslassventil v_2, sondern auch das kleine Ventil mit dem Schwimmer heben und wenn nun eine gewisse Wassermenge durch die Ventile mit der komprimirten Luft übergerissen wird, so muss das Niveau im Raume H steigen (dieser Fall ist auf der rechten Seite des Apparates dargestellt) und der Schwimmer wird das kleine Ventil so lange in der Höhe halten, bis soviel Wasser durch das Röhrchen in den Raum D abgeflossen ist, dass das Ventil durch das Sinken des Schwimmers wieder zum Schließen gebracht und der Wasserabfluß aufgehoben wird. Dadurch erreicht man nicht blos, dass die Wasserverluste immer ersetzt werden, sondern auch, dass die Auslassventile stets mit einer Wasserschichte bedeckt bleiben, also der Rücktritt der komprimirten Luft aus der Röhre E nach den Aufsätzen DD^1 durch Wasserabschluss vollständig verhütet ist. Die Röhre ist gegen die Mitte zu etwas steigend, um dem übergerissenen Wasser das Zurückfließen nach H zu gestatten.

Mit diesem Apparate sind sehr bedeutende Vortheile verbunden. Die Reibung und Abnützung des Kolbens fällt äußerst gering aus, der Schluß bei den Liderungen (die übrigens auch hydrostatisch sein können) ist blos gegen Wasser und nicht gegen Luft dicht zu halten und kann um so leichter hergestellt werden, als es viel weniger schwierig ist, einen Zylinder genau abzudrehen als auszubohren. Ferner erwächst bei der Anwendung des Bramahkolbens der Vortheil, dass es möglich ist, durch Auswechslung des Kolbens und der Liderung die Kraft der ganzen Maschine zu verändern und dann liegt ein ganz besonderer Vorzug des eben beschriebenen Apparates darin, dass der schädliche Raum gänzlich wegfällt, wenn nur die Bedingung erfüllt bleibt, daß der Apparat stets soviel Wasser enthält, als erforderlich ist, um nach vollendetem Kolbenschub

den Raum D oder D′ vollständig auszufüllen. Das kleine Ventil mit dem Schwimmer wird nicht gegen alle Verluste schützen, die obige Bedingung kann aber leicht dadurch erfüllt werden, daß man entweder eine kleine Speisepumpe anwendet oder den Zylinder B, mittelst einer engen Röhre, mit dem in den Reservoirs enthaltenen Wasser, (wovon im folgenden die Rede sein wird), in Verbindung bringt.

Denkt man sich zwei Apparate nach Fig. 3 dergestalt mit einander in Verbindung, dass der eine die Luft, nachdem er dieselbe auf einen gewissen Grad komprimirt hat, nicht directe in die Reservoirs, sondern in den zweiten Apparat (dessen Einlassventile also nicht mit der freien Luft, sondern durch eine Röhre mit den Auslassventilen des ersten Apparates in Verbindung stehen) leitet, um erst durch diesen auf die volle Spannung gepreßt zu werden, so hat man offenbar auch die Vortheile erreicht, welche mit den in Fig. 1 und 2 dargestellten Konstruktionen verbunden sind. Damit die mechanische Leistung der zwei Apparate (nach Fig. 3) gleich groß ausfallen, hat man das Verhältniss der Volumen beider Kolben durch Rechnung zu bestimmen.

Nach diesem soll über die Konstruktion der Kompressionsmaschinen nicht weiter eingegangen werden; auch unterlassen wir die Ventile, Stopfbüchsen, Liderungen und überhaupt die einzelnen Maschinentheile näher zu besprechen, es soll genügen, Grundzüge angegeben zu haben, nach welchen dem Zweck entsprechende Apparate konstruirt werden können.

§. 11.

Damit die in den Presszylindern auf n Atmosphären komprimirte Luft beim Eintreten in die Reservoirs sich nicht wieder ausdehnen kann, also die zur Kompression aufgewendete Arbeit nicht wieder verloren geht, ist es nothwendig, dass die Spannung in den Reservoirs selbst nie geringer sei als n Atmosphären. Ob der Zug die Thalfahrt eben beginne oder nahezu vollendet habe, ob also die Reservoirs eine kleine oder große Menge komprimirter Luft enthalten, die ausgesprochene Bedingung muss erfüllt sein, damit der Arbeitsverlust nicht eintritt. Zu diesem Zwecke gelangt man am einfachsten dadurch, dass man die Reservoirs oben auf der Rampe (am Übergangspunkte) vollständig mit Wasser füllt bevor die Thalfahrt beginnt und einen Regulator anbringt, welcher dessen Austritt nur dann gestattet, wenn die innere Pressung n Atmosphären beträgt. Es wird daher, weil das Wasser als inkompressibel angesehen werden kann, mit jedem Hub der Luftpresskolben ein Volumen Wasser, welches dem Inhalt des kleinsten Zylinders der Kompressionsmaschine (Fig. 1) gleich ist durch gepreßte Luft verdrängt und zwar gilt dies für die ganze Fahrt, bis endlich alles Wasser oder wenigstens der größte Theil, durch komprimirte Luft ersetzt und der Zug unten an der Rampe angekommen ist.

Gegen einen Arbeitsverlust ist man indessen bei dieser Einrichtung nicht geschützt. Da nämlich das Füllwasser der Reservoirs unter einer Pressung von

n Atmosphären durch den Regulator entweichen muß, so geht hierdurch für die ganze Fahrt eine mechanische Arbeit verloren, welche der Leistung gleichkömmt, die aufgewendet werden müßte, um die ganze Wassermenge der Reservoirs auf eine Höhe von (n—1) 10,33 Meter zu heben. Könnte man die Reservoirs unter den konstanten Druck einer Wassersäule bringen, so würden keine Arbeitsverluste entstehen, indem das, durch die komprimirte Luft verdrängte und auf jene Höhe gehobene Wasser beim Verbrauch der Luft wieder heruntersinken und dieselbe mit der constanten Spannung von n Atmosphären aus den Reservoirs treiben würde. Dieß könnte leicht bei stationären Maschinen erzielt werden, ist aber bei Lokomotiven unanwendbar, daher dem Verluste auf andere Weise vorgebeugt werden muß.

Läßt man das gespannte, durch den Regulator entweichende Wasser auf einen besonderen Kolbenmechanismus (nach Art der Wassersäulenmaschine) wirken und bringt diesen mit einem Luftpresskolben in Verbindung, so wird die Kraft des Wassers für die Luftkompression benützt und der Verlust, den wir soeben bezeichnet haben, ist aufgehoben. Es könnte auch eine hydraulische Luftpresse nach irgend einer passenden Konstruktion angewendet werden, wobei besonders dafür gesorgt sein muss, dass die Maschine compendiös, einfach und solid ausfällt, wenn auch dabei der Koefficient des Nutzeffektes nicht einen sehr günstigen Werth erreicht. — Will man, um alle Komplikationen der Lokomotive zu vermeiden, auf die Benützung des Kraftwassers Verzicht leisten, so bleibt nichts anders übrig, als dasselbe direct in den Tender zu leiten und bei der Bergfahrt als Speisewasser für den Dampfkessel zu verwenden.

§. 12.

Bei der früheren Berechnung der Arbeitsleistung, die aufzuwenden ist, um Luft zu komprimiren, ist auf die Temperaturerhöhung keine Rücksicht genommen worden. Wo es sich um geringe Spannungsunterschiede handelt, bietet die angewendete Mariotte'sche Formel genügende Genauigkeit, wo aber diese Unterschiede so bedeutend werden, wie in unserem Falle, wird der Einfluß der Temperaturerhöhung so groß, dass er bei einer genauen Rechnung nicht mehr vernachlässiget werden darf und man zur Bestimmung der mechanischen Arbeit, von der Poisson'schen Wärmeformel:

$$A = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} \left\{ \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{\varkappa - 1}{\varkappa}} 1 - \right\} V p$$

in welcher $\varkappa$ das Verhältniss der Wärmekapazität der Luft bei gleichem Drucke zu der bei gleichem Volumen ausdrückt, die übrigen Buchstaben aber die frühere Bedeutung haben, Gebrauch machen muß. Da wir jedoch gesehen, daß die Reservoirs während der Luftkompression Wasser enthalten und auch die Einrichtung zu treffen sein wird, dass die Kompressionszylinder stets von kaltem Wasser umspült werden, daher die bei der Kompression freigewordene Wärme zum großen Theil von Wasser absorbirt wird, so läßt sich auch einsehen, dass

durch diese Mittel die Temperaturerhöhung bedeutend geringer ausfallen muss und daher auch die Anwendung der Mariott'schen Gleichung eher zulässig ist. Wollte man eine scharfe Rechnung durchführen, so hätte man nicht blos auf die Temperatur, sondern auch auf den Einfluss des schädlichen Raumes, die Reibung der Luft an den Wandungen der Leitungsröhren und Reservoirs, die Ventile ꝛc. ꝛc. Rücksicht zu nehmen; weil es sich aber hier nur darum handelt das Wesen unseres neuen Systemes mit einfachen Andeutungen klar zu machen, so sollen auch die oben gefundenen Rechnungsresultate beibehalten werden.

Über die Verwendung der komprimirten Luft, als Motor, bei der Bergfahrt bleibt wenig zu bemerken übrig. Man wird dieselbe in den Dampfzylindern gerade so wirken lassen wie den Dampf selber. Dabei muss, weil die Spannung in den Reservoirs am Anfang der Bewegung sehr groß ist und während der Fahrt, nach Maaßgabe des Luftverbrauches, immer abnimmt, entweder ein Regulator angewendet werden, welcher die variable Spannung in eine konstante (5 bis 6 Atmosphären) umwandelt *) oder man kann, wenn nicht zu große Schwierigkeiten in der Ausführung dafür entstehen, Steurungen mit variabler Expansion anwenden. Durch Versuche ist dann festzustellen ob es zweckmässiger ist, die gepresste Luft mit dem Dampfe zu vermischen, oder ob Luft und Dampf gesondert den Triebzylindern zugeführt werden sollen. Im letzteren Fall könnte man die Dampfzylinder der Lokomotive auf gewöhnliche Weise mit Dampf, diejenigen des, die Reservoirs führenden Wagens mit komprimirter Luft betreiben und hätte das Adhäsionsgewicht des letztern, der Zugkraft, welche durch die Wirkung der komprimirten Luft ausgeübt werden kann, anzupassen. —

Da die Spannung der Luft in den Reservoirs während der Bergfahrt immer abnimmt und auf 3½ bis 3 Atmosphären herabgesunken nicht mehr eine genügende Wirkung auf die Triebkolben auszuüben vermag, so dürfte es von Vortheil sein, in der Nähe des Heizraumes der Lokomotive einen Dilator anzubringen, in welchem die nur noch wenig gespannte Luft erhitzt und dadurch auf eine höhere Spannung gebracht würde. — Wie bei der Kompression der Luft Wärme frei wird, so wird bei der Ausdehnung derselben Wärme gebunden. Hat man daher Mittel anzuwenden, um die Reservoirs und Zylinder bei der Thalfahrt vor zu großer Erhitzung zu schützen (Absorbtion der Wärme durch Wasser, wodurch zugleich das Speisewasser der Lokomotive für die Bergfahrt vorgewärmt wird) so wird man auch sich dagegen sichern müssen, dass sich in den Reservoirs nicht Eis bilden kann, wenn die komprimirte Luft beim Aufwärtsfahren ausgedehnt wird. Zu diesem Zwecke hat man alles Wasser, welches sich noch, nach vollendeter Thalfahrt in den Reservoirs befindet, durch einen Hahn vollständig abzulassen und zugleich die Kompressionsapparate, besonders wenn sie von der in Fig. 3 dargestellten Konstruktion sind, mit warmem Wasser, heißer Luft oder Dampf zu umgeben. Da bei der Thalfahrt eben soviel Wärme

*) S. Dingler's polyt. Journal, Bd. CLIX. Heft 2. „Druckregulator v. C. Willy."

frei wird, als sich bei der Bergfahrt bindet, so wird es jedenfalls nicht sehr schwer sein, sich stets vor schädlichen Temperaturen zu schützen.

§. 13.

Für die Adhäsion der Triebräder auf den Schienen ist bei den in den früheren §§. durchgeführten Rechnungen, der Koefficient $f = \frac{1}{6}$ angenommen worden. Es ist ein Erfahrungsresultat, dass der Werth von f sehr von dem Zustande der Schienen abhängt, unter den günstigsten Verhältnissen bis auf $\frac{1}{3}$ steigen, im ungünstigsten Falle aber, wenn die Schienen feucht oder beschneit sind, bis auf $\frac{1}{10}$ herabsinken kann. Gerade dieser letztere Fall wird aber bei Gebirgsbahnen meistens eintreffen, weil der Winter in bedeutenden Höhen länger dauert, die atmosphärischen Niederschläge und neblige Witterung häufiger eintreten und die Bahnen oft an Stellen vorbeiführen, die der Sonne und trockenen Winden unzugänglich sind, wo also die Schienen beinahe immer feucht bleiben.

Es ist unter §. 7 gezeigt worden, dass man mit einem Adhäsionsgewicht von 65 Tonnen, einen Zug von 121 Tonnen über eine Rampe von 5 Prozent Steigung aufwärts zu befördern im Stande ist, ohne dass ein Gleiten der Triebräder auf den Schienen eintritt, wenn der Adhäsionskoefficient $f = \frac{1}{6}$ beträgt. Aus der bezüglichen Gleichung (2):

$$Q = \frac{q \left\{ 1000\, f - (12 + 1000 \sin. \alpha) \right\}}{6 + 1000 \sin. \alpha}$$

ist ersichtlich, daß der Werth von Q im einfachen, geraden Verhältniss mit dem Adhäsionsgewicht (q) zunimmt, so dass, wenn für q der doppelte Werth, oder $q = 2 \cdot 65 = 130$ Tonnen gesetzt wird, man für Q auch $2 \cdot 121 = 242$ Tonnen erhält; wird dagegen der Adhäsionskoefficient auf das Doppelte erhöht, also $f = 2 . \frac{1}{6} = \frac{1}{3}$ gesetzt, so folgt: $Q = 314$ Tonnen, gleich dem $2\frac{6}{10}$ fachen des ersten Werthes; für den ungünstigsten Fall, in welchem $f = \frac{1}{10}$ wird (bei feuchten oder beschneiten Schienen) ergiebt sich $Q = 44$ Tonnen, es sinkt folglich die Last des anzuhängenden größten Zuges beinahe auf $\frac{1}{3}$ des ersten Werthes herab. Man sieht hieraus von welch' außerordentlichem Vortheil es sein muss, den Zustand der Schienen resp. den Koefficienten f in die Gewalt zu bekommen. Es ist auffallend genug, dass bisher so wenig Anstrengungen und Versuche gemacht worden sind, um die Adhäsion von den Witterungsverhältnissen so viel wie möglich unabhängig zu machen, dagegen aber man sich nicht scheut, wichtigen

Rücksichten entgegen, die nöthige Adhäsion durch Vergrößerung des Adhäsionsgewichtes theuer zu erkaufen. Dabei reicht man aber bei Steigungen von 5 Prozent selbst mit den schwersten Gebirgslokomotiven nicht mehr aus, wenn der Adhäsionskoefficient sich auf einen niedern Werth stellt und dies ist auch der Grund, warum Flachat an die äußerste Grenze gegangen ist und das Gewicht des ganzen Zuges für die Adhäsion benützt. Der Einwurf, Flachat habe des Guten zuviel gethan, weil man die Alpenbahnen bei 5 Prozent Steigung zu jeder Jahreszeit mit gewöhnlichen Berglokomotiven befahren könne, ist jedenfalls unrichtig, denn er schließt die Voraussetzung in sich, dass der Adhäsionskoefficient stets auf seinem günstigsten Werth stehe; solange man jedoch den Zustand der Schienen nicht in seiner Gewalt hat, muss man sich, wenn auf einen geregelten und sicheren Betrieb gerechnet werden soll, gegen den ungünstigsten Fall, der ja während der Fahrt mit jedem Augenblicke eintreten kann, schützen.

Die Schienen nehmen erfahrungsgemäß den günstigsten Zustand an, wenn sie nass oder feucht waren und rasch abgetrocknet werden; für diesen Fall kann der Reibungskoefficient bis auf $\frac{1}{3}$ steigen.

Es fragt sich daher, ob man nicht im Stande sein wird, geeignete Mittel aufzufinden, um die Schienen unmittelbar vor den Triebrädern zu trocknen, da es sich ja nur darum handelt, eine sehr dünne Wasserschichte von ihrer Oberfläche zu entfernen. Das neue System mit komprimirter Luft eignet sich ganz besonders, diesen Zweck auf die einfachste Weise zu erreichen. Man hat blos eine enge Röhre mit den Luftreservoirs in Verbindung zu bringen, dieselbe an den Wänden des Heizraumes der Lokomotive vorbeizuführen und in einer kleinen Öffnung unmittelbar über den Schienen ausmünden zu lassen, so hat man erreicht, dass stets ein feiner Strom erhitzter, trockener Luft die Feuchtigkeitsschichte von den Schienen mit großer Begierde auffaugt, mithin der Zustand eintritt, welcher für die Adhäsion so günstig ist. Im Winter, wenn das Wasser auf den Schienen gefriert und eine dünne Eisschichte bildet, dürfte es zweckmäßig sein, einen offenen, beladenen Güterwagen von gewöhnlicher Konstruktion vor die Lokomotive, also an die Spitze des Zuges, zu stellen, damit durch denselben die Eisschichte gebrochen und mittelst einer einfachen Vorrichtung entfernt wird, um so die Schienen für den heißen Luftstrom vorzubereiten. Wenn man bedenkt, dass die Züge beim Ersteigen der Rampe eine sehr geringe Geschwindigkeit besitzen (etwa 4 Meter) und dass man Feuer und gespannte Luft in genügendem Maaße zur Disposition hat, so wird man dadurch sofort die Überzeugung gewinnen, dass diese Mittel dazu benützt werden müssen, um sich von dem so sehr veränderlichen Zustand der Schienen so viel wie möglich unabhängig zu machen und dass dieselben auch genügen, um den Adhäsionskoeffizienten stets, wenn nicht auf dem höchsten, so doch auf dem Mittelwerth von $\frac{1}{5} - \frac{1}{6}$ zu erhalten. Dieser Werth reicht aber, wie oben an einem Beispiele gezeigt worden ist, schon hin, um Züge von

bedeutendem Gewichte zu befördern. Will man weiter gehen, so kann durch Vorspannen einer zweiten Lokomotive geholfen werden, ohne dass man dabei, wie bei dem gewöhnlichen System in den Nachtheil verfällt, eine übermäßig grosse todte Last mit befördern zu müssen, weil ja nach unserem System das bei der Bergfahrt gehobene Gewicht während der Thalfahrt eine nützliche Arbeit verrichtet. Hat man 2 Lokomotiven à 35 Tonnen und einen Luftwagen zu 25 Tonnen Adhäsionsgewicht, so wird für $f = \frac{1}{6}$ und $\sin. \alpha = \frac{1}{20}$ (5 Prozent Steigung) die große Last des angehängten Zuges

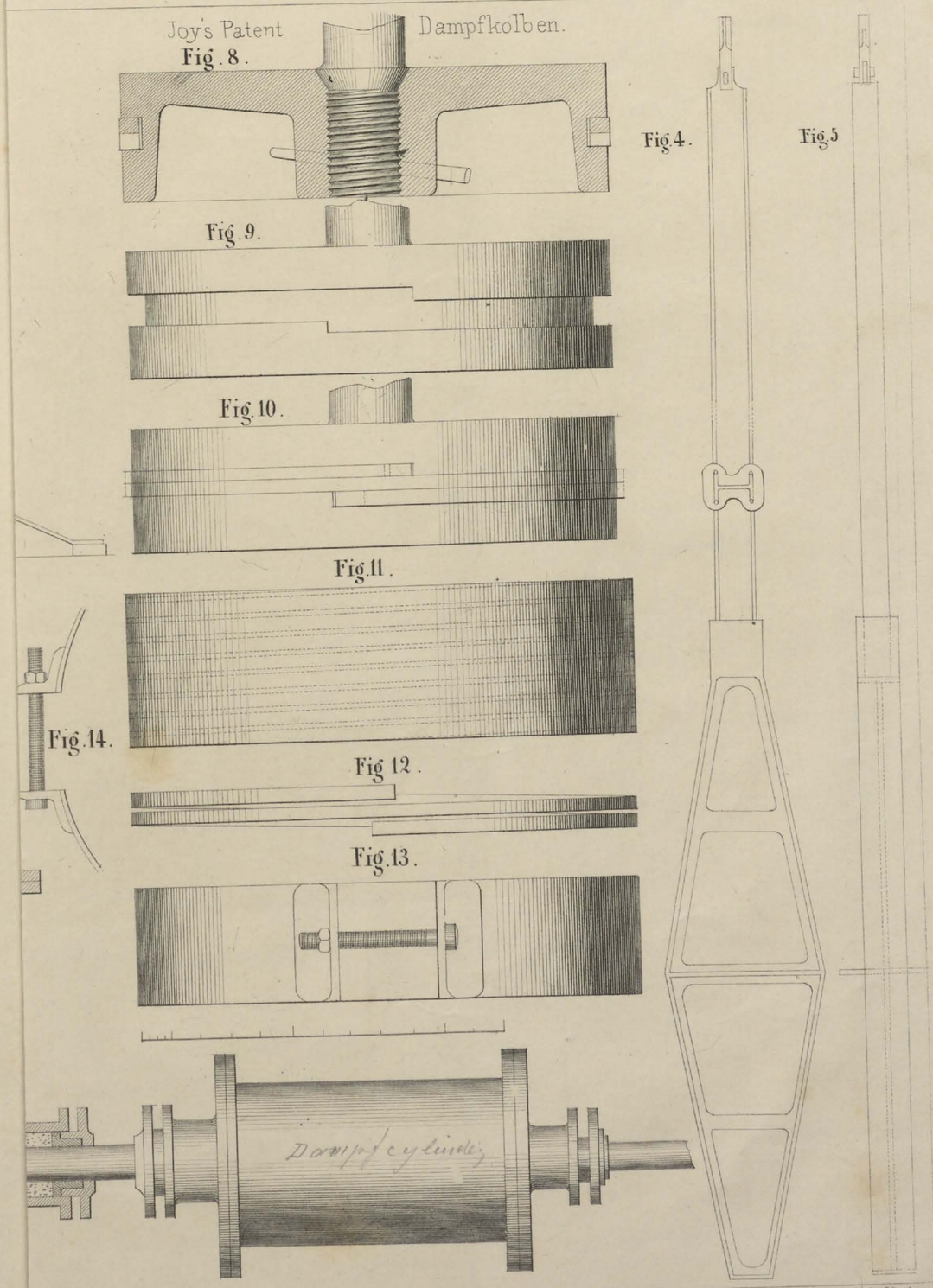
$$Q = \frac{95 \left\{ 1000\tfrac{1}{6} - (12 + 50) \right\}}{56} = 177 \text{ Tonnen Brutto}$$

und für $f = \frac{1}{5}$:

$Q = 234$ Tonnen Bruttolast — ein Resultat mit dem man wohl für alle Fälle mehr als ausreicht.

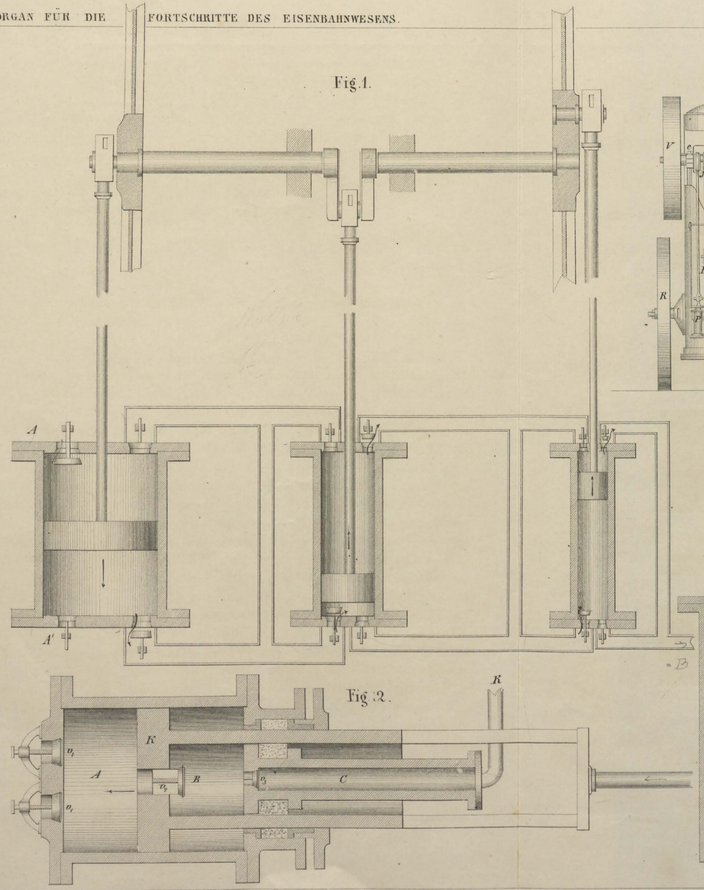
§. 14.

Um zum Schlusse zu eilen, soll über die Terrain- und Kunstbauten, die Schutzmittel gegen Erdschlipfe, Gebirgswasser, hohen Schneefall, Lawinen, großen Frost ꝛc. nicht näher eingegangen werden; die Schwierigkeiten, welche in dieser Beziehung zu überwinden sind, gelten für alle Bahnen, die über die Alpen führen, das neue System verlangt diesen gegenüber nichts Eigenthümliches. Umfassende Terrainstudien haben die Möglichkeit der Anlage von Alpenbahnen bereits außer Zweifel gesetzt; besonders bei Anwendung großer Steigungen wird man nicht auf unüberwindliche Hindernisse stoßen und wenn in der höhern Gebirgsregion, in der Nähe der Übergangspunkte, die ausgedehntesten Strecken überwölbt werden müssen, um den nöthigen Schutz zu gewähren, so ist dieß noch lange kein Grund zu ernstlichen Bedenken. Man kann und wird die Aufgabe lösen, man ist selbst gezwungen dazu durch die dringenden Forderungen der unberechenbaren Interessen, welche alle verlangen, dass Bahnverbindungen über die Alpen geschaffen werden. — Rücksichtlich des neuen Systemes dürfen wir wohl annehmen, dass dessen Vorzüge überzeugend aus dem Mitgetheilten hervorgehen, es handet sich nun darum, daß dasselbe aufgenommen, geprüft, vervollständiget und verwerthet werde. Umfassende Versuche sind anzustellen über die Konstruktion der Kompressionsapparate und Reservoirs, über die Grenze der größten, zulässigen Luftspannung, die zweckmäßigste Verwendung der Luft als Motor bei der Bergfahrt ꝛc.; überhaupt muss das Gebiet der Erfahrung betreten werden, damit diese die Ausführbarkeit und den Werth des neuen Systemes bestätige und die gewonnenen Thatsachen selbst für dasselbe streiten. — Der Zweck ist groß und der Erfolg kann nicht ausbleiben, denn das Ziel liegt nahe und der Weg ist gebahnt, der ihm auf kürzester Linie entgegenführt. —



Wiesbaden, C. W. Kreidel's, Verlag.

Fig. 1.



Chochot's Lokomobile.

Fig. 6.

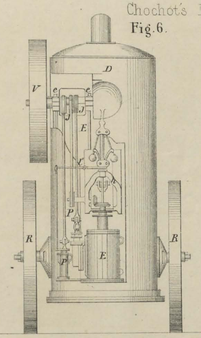
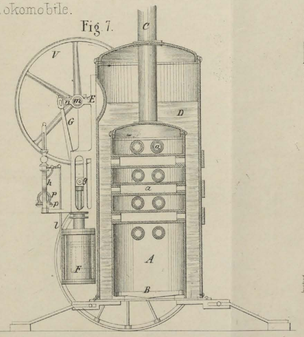


Fig. 7.



Joy's Patent Dampfkolben.

Fig. 8.

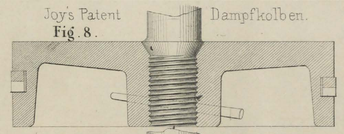


Fig. 4.

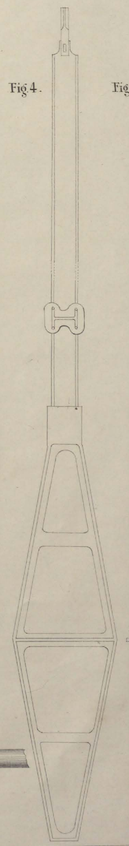


Fig. 5

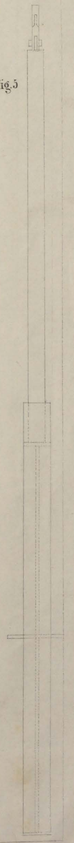


Fig. 9.

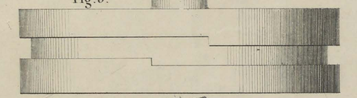


Fig. 10.

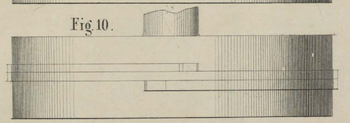


Fig. 11.

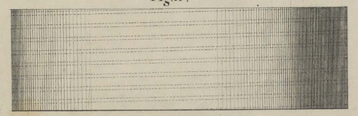


Fig. 12.

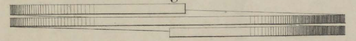


Fig. 13.

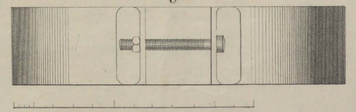


Fig. 14.

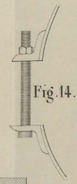


Fig. 3.

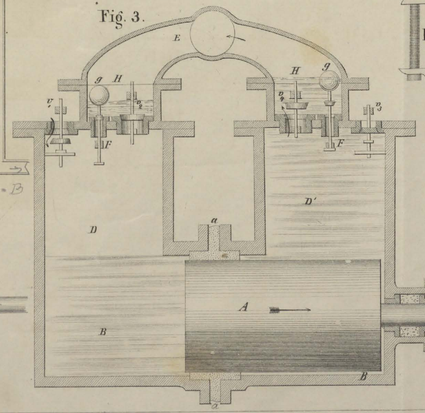
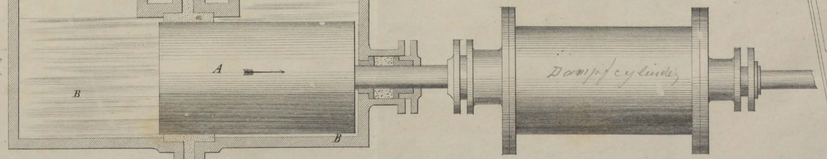


Fig. 2.



Lith. Anst. v. J. Lehnhardt in Mainz.

Wiesbaden, C. W. Kreidel's, Verlag.