

**Die wirtschaftliche Eignung
des elektrischen und dieselektrischen
Betriebes auf Vollbahnen auf Grund der
Kriterien des Kapital-Ertrages und der
Rentabilität**

Von der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich

**zur Erlangung der
Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften genehmigte
Promotionsarbeit**

**vorgelegt von
ROBERT FEHR
aus Berlin**

Referent: Herr Prof. Dr. B. Bauer

Korreferent: Herr Priv.-Doz. Dr. K. Sachs

V. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in dieser Studie aufgestellten Gleichungen für die Differenz des Kapitalertrages bzw. der Jahreskosten der elektrischen und dieselelektrischen Traktion und für das Rentabilitätsverhältnis dieser Betriebe geben Aufschluß über die wirtschaftliche Überlegenheit des einen der beiden Traktionssysteme gegenüber dem anderen je nach Anwendung des Kriteriums des «Kapitalertrages» oder der «Rentabilität». Jene Ausdrücke sind aufgestellt worden, ohne daß Annahmen über die Einnahmen sowie die Höhe derjenigen Kostenpunkte, welche für die beiden Betriebe gleich groß sind, gemacht wurden. Ebenso können wir auf eine Berechnung derjenigen Anlageteile, welche für den elektrischen und den dieselelektrischen Betrieb identisch sind, verzichten, soweit wir uns darauf beschränken, die wirtschaftliche Eignung des einen der beiden obgenannten Betriebe gegenüber dem anderen zu bestimmen und von einer Ermittlung des Kapitalertrages und der Rentabilität für jedes der beiden Traktionssysteme absehen.

Als Grundlage des Vergleiches sollten die Verkehrskapazität und Steigung der Strecke, sowie die tonnenkilometrische Belastung dienen.

Die Berechnung der Kapitalien für die einzelnen Anlageteile ergab die folgenden Resultate:

1. Triebfahrzeuge: Die Anlagekapitalien der Triebfahrzeuge sind proportional der Verkehrskapazität, wobei deren Werte für die reinelektrischen Fahrzeuge niedriger liegen als für die dieselelektrischen (Tabelle VIII). Die Erklärungen hierfür sind:

- a) die größere Anzahl der zu erwerbenden Triebfahrzeuge bei der Betriebsumstellung auf das dieselelektrische gegenüber denen bei der Einführung des reinelektrischen Traktionssystems, bedingt durch die längere Aufenthaltszeit je gefahrenen Kilometer der dieselelektrischen Lokomotiven und Triebwagen in den Werkstätten (Tabelle VI).
- b) der höhere Preis der dieselelektrischen gegenüber den reinelektrischen Triebfahrzeugen je installierte Leistung (Tabelle VII).

Mit zunehmender Steigung der Strecke erhöhen sich je Verkehrskapazität die Anlagekapitalien der Triebfahrzeuge. Wir erklären dies durch:

- a) geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten und geringere Zuggewichte für steilere Rampen, wodurch Anzahl der Lokomotiven und Triebwagen je Verkehrskapazität vermehrt wird (Tabelle III).
- b) größere in den Lokomotiven und Triebwagen zu installierende Leistungen auf Strecken größerer Steigung, wodurch der Preis je Triebfahrzeug erhöht wird (Tabelle IV).

2. **Fahrleitungen:** Die Anlagekapitalien der Fahrleitungen hängen von dem Ausbau der Strecke hinsichtlich seiner Gleiszahl ab. Wir haben den maximalen Wert der Verkehrskapazität festgelegt, bis zu welchem bei einer vollständigen Ausnutzung der Anlagen ($V_{jmax} = 8760 V_k$) eine Strecke durchgehend eingleisig ausgebaut werden kann, ebenfalls den minimalen Wert dieser Größe, von dem an die Strecke durchgehend zweigleisig anzulegen ist. Zwischen jenen beiden Werten verändert sich das Verhältnis der Länge von zweigleisig ausgebauten Streckenabschnitten zu der gesamten Streckenlänge in geradliniger Abhängigkeit von der Verkehrskapazität (Kurvenblatt 3). Die Kosten der Fahrleitungen wurden proportional den Gleiskilometern, unabhängig von der Steigung der Strecken, angesetzt. Mithin sind dieselben oberhalb und unterhalb obgenannter Werte der Verkehrskapazität konstant, während sie zwischen diesen Werten proportional der Verkehrskapazität sind.

3. **Unterwerke:** Die Anlagekapitalien der Unterwerke je Steigung der Strecken wurden in dem Bereich der Verkehrskapazität von zirka 200—2000 t km/km h entsprechend einer jährlichen maximalen Belastung der Strecke von zirka $1,75 \cdot 10^6$ bis $17,5 \cdot 10^6 \frac{t \cdot km}{km \cdot Jahr}$ in erster Annäherung zerlegt in einen konstanten Teil und einen der Verkehrskapazität proportionalen Teil berechnet (siehe Kurvenblatt 9). Diese Anlagekapitalien vergrößerten sich mit zunehmender Steilheit der Strecken infolge verringerten Unterwerksabständen und größerer Unterwerksleistung, hierbei machen die Flachlandstrecken eine Ausnahme. Letzteres wird erklärt durch die Berechnung des Abstandes der Unterwerke, sowie der in denselben zu installierenden Leistungen, aus dem stündlichen Energieverbrauch auf dem zum Unterwerk gehörigen Streckenabschnitt. Während sich auf Hügelland- und Gebirgsstrecken mit zunehmender Steigung die Werte des Energieverbrauches höher einstellen können, war auf Flachlandstrecken das Gegenteil der Fall. Eine ausführliche Erklärung hierfür wurde auf den Seiten 89 und folgende gegeben.

4. **Profiländerungen:** Infolge Überspannung der Gleise mit dem Fahrdraht bei Einführung des rein elektrischen Traktionssystems ist das Streckenprofil zu vergrößern. Die Kosten hierfür wurden proportional den Streckenkilometern je Ausbau der Strecke bezüglich ihrer Gleiszahl sowie verschieden für Flachland-, Hügelland- und Gebirgsstrecken aufgeschrieben, wobei für letztere die Kosten pro Kilometer höher an-

gesetzt wurden unter der Annahme, daß eine Profilerweiterung auf gebirgigen Strecken auf größere Hindernisse trifft als auf Flachlandstrecken.

Der Ausbau der Strecken wurde, wie im Abschnitt über die Fahrleitungen erwähnt, bis zu einer gewissen Verkehrskapazität durchgehend eingleisig und von einem bestimmten Wert dieser Größe an zweigleisig durchgeführt. Zwischen diesen Werten bestand für das Verhältnis der Länge zweigleisig ausgebauter Streckenabschnitte zu der gesamten Streckenlänge eine geradlinige Abhängigkeit von der Verkehrskapazität. So waren die Umbaukosten der Strecke je Steigung derselben unterhalb und oberhalb obgenannter Werte der Verkehrskapazität konstant und zwischen diesen Werten ergab sich eine geradlinige Funktion zwischen den Kosten für die Profilvergrößerung und der Verkehrskapazität je Steigung der Strecken (siehe Seite 61).

5. Die Kosten der Kabelung der Fernmeldeleitungen in der Nähe der Bahnkörper berechnete sich zu einem konstanten Wert pro Streckenkilometer, unabhängig von der Verkehrskapazität und der Steigung der Strecken (siehe Seite 62).

6. Die Erstellungskosten der Tank- und Öltransportanlagen wurden proportional dem Brennstoffverbrauch des dieselektrischen Betriebes angesetzt, wobei der Wert der maximalen tonnenkilometrischen Belastung den Berechnungen zu Grunde gelegt wurde ($V_{j_{\max}} = 8760 V_k$). Hierbei ergab sich eine Proportionalität zwischen diesen Kosten und der Verkehrskapazität. Die Proportionalitätsfaktoren wachsen mit zunehmender Steigung der Strecken auf den Hügelland- und Gebirgsstrecken an, während sie auf Flachlandstrecken kleinere Werte mit zunehmender Steigung annehmen. Diese Tatsache wurde ausführlich auf den Seiten 89 und folgende erklärt (siehe Tabelle XI).

7. Betriebskapital für Dieseltreibstoffe: Die Betriebskapitalien für die Dieselöle wurden als Funktion des vierteljährlichen Brennstoffverbrauches angesetzt. Hierbei gilt das für die Tank- und Öltransportanlagen Gesagte, und es bestand eine Proportionalität zwischen den Anlagekapitalien der Tank- und Öltransportanlagen und den Betriebskapitalien für die Dieselöle (siehe Tabelle XI).

Die Zusammenfassung der Anlage- und Betriebskapitalien ergab das folgende Bild (siehe Tabelle XII):

Diejenigen Anlage- und Betriebskapitalien, welche je Anlageteil verschiedene Beträge für beiderlei Traktionssysteme aufweisen, sind proportional der Verkehrskapazität je Steigung der Strecke für die dieselektrische Traktion und stehen in geradliniger Abhängigkeit von dieser Größe für den reinelektrischen Betrieb, wobei dieselben mit zunehmender Steilheit der Rampen je Verkehrskapazität anwachsen. Die Geraden,

welche in einer graphischen Aufzeichnung obgenannte Funktionen darstellen, entspringen für die dieselektrische Traktion im Nullpunkt des Koordinatensystems. Für den elektrischen Betrieb gehen sie von einem positiven Wert der Ordinatenachse (Achse der Anlage- und Betriebskapitalien) aus. Für letztgenanntes Traktionssystem sind diese Kurven verschieden für durchgehend eingleisig, durchgehend zweigleisig, sowie teilweise ein- und zweigleisig ausgebaute Strecken. Hierbei wachsen die Anlage- und Betriebskapitalien der dieselektrischen Traktion mit zunehmender Verkehrskapazität stärker an als diejenigen der elektrischen Traktion. So erfordert für hohe Werte der Verkehrskapazität die dieselektrische Traktion höhere Kapitalien als die elektrische Traktion, und für niedrigere Werte der Verkehrskapazität sind die Anlage- und Betriebskapitalien der dieselektrischen Traktion geringer als diejenigen des elektrischen Betriebes.

Im weiteren Verlauf der Studie haben wir uns mit den Begriffen der «Wirtschaftlichkeit» und der «Rentabilität» auseinandergesetzt, wobei wir letztere vom «volkswirtschaftlichen» Standpunkt aus betrachten wollten. Um diese Begriffe auf die Zugförderungsbetriebe anwenden zu können, mußten wir die Jahreskosten der beiden Traktionssysteme berechnen, die wir zerlegten in Kosten abhängig von den Anlage- und Betriebskapitalien (Festkostenlast) und abhängig von der tonnenkilometrischen Belastung.

Wir zeigten, daß die jährliche Festkostenlast sich durch Multiplikation der Anlage- und Betriebskapitalien mit der Jahresquote für den Kapitaldienst einschließlich der Umsatz unabhängigen Betriebsausgaben, Verwaltungskosten usw., welche je Verkehrskapazität und Steigung der Strecken, sowie je Kostenpunkt den gleichen Wert aufweist, ergab. Faßten wir diesen Teil der Jahreskosten zusammen und stellten wir ihn in Abhängigkeit der Verkehrskapazität graphisch dar, so erhielten wir dasselbe Bild bei Verwendung eines geeigneten Maßstabes der Ordinate, welches die Aufzeichnung der gesamten Anlagekapitalien in Funktion der Verkehrskapazität zeigte (Tabelle XIV).

Die Jahreskosten, abhängig von der tonnenkilometrischen Belastung, teilten wir auf in Kosten proportional der jährlichen Fahrstrecke aller Triebfahrzeuge und proportional der Förderarbeit.

Die jährliche Fahrstrecke der Triebfahrzeuge ist proportional der jährlichen tonnenkilometrischen Belastung. Mithin sind die der jährlichen Fahrstrecke der Triebfahrzeuge proportionalen Jahreskosten geradlinig abhängig von der tonnenkilometrischen Belastung je Steigung der Strecken. Diese Kosten vergrößern sich mit zunehmender Steigung der Strecken je Fahrstrecke pro Jahr bzw. je jährliche tonnenkilometrische Belastung. Dies erklärt sich aus:

- a) geringeren Zuggewichten auf Hügelland- und Gebirgsstrecken als auf Flachlandstrecken;
- b) größeren installierten Triebfahrzeugleistungen auf Strecken größerer Steigung;
- c) längeren Aufenthaltszeiten in den Werkstätten je gefahrenen Triebfahrzeugkilometer infolge geringerer Durchschnittsgeschwindigkeiten auf steileren Rampen. Es ergab sich: Die Jahreskosten, abhängig von der jährlichen Fahrstrecke der Triebfahrzeuge, sind für einen jeden Wert der jährlichen tonnenkilometrischen Belastung für die diesel-elektrische Traktion höher als für die elektrische (Tabelle XVa).

Es ergaben sich für die Jahreskosten proportional der jährlichen Förderarbeit: Die Förderarbeit ist proportional der tonnenkilometrischen Belastung. Mithin sind die Jahreskosten abhängig von der Förderarbeit proportional der tonnenkilometrischen Belastung je Steigung der Strecken. Diese Kosten je Wert der Förderarbeit pro Jahr bzw. der jährlichen tonnenkilometrischen Belastung vergrößern sich mit zunehmender Steigung auf den Hügelland- und Gebirgsstrecken, während sie auf den Flachlandstrecken mit zunehmender Steigung abnehmen (Tabelle XIX). Eine ausführliche Erklärung hierfür wurde auf den Seiten 89 und folgende gegeben. Aus Tabelle XIX geht hervor: Die von der Förderarbeit abhängigen Jahreskosten der dieselektrischen Traktion sind für einen jeden Wert der jährlichen tonnenkilometrischen Belastung höher als diejenigen der reielektrischen Traktion.

Für die gesamten Jahreskosten, abhängig von der tonnenkilometrischen Belastung, ergab sich: Die Jahreskosten je Steigung der Strecken sind proportional der jährlichen tonnenkilometrischen Belastung und vergrößern sich je Wert derselben mit zunehmender Steigung auf Hügelland- und Gebirgsstrecken, während sie sich auf Flachlandstrecken verringern (Tabelle XX).

Wirtschaftlichkeits- und Rentabilitätsvergleich zeigen, daß die wirtschaftliche Eignung eines Bahnbetriebes vom Gesichtspunkt der Kriterien: Kapitalertrag und Rentabilität aus nur beurteilt werden kann, wenn zwei der Größen: Verkehrskapazität, tonnenkilometrische Belastung und jährliche Nutzungszeit bekannt sind. Obgenannte Vergleiche lehren, daß die dieselektrische Traktion für Bahnbetriebe kleiner Verkehrskapazität und niedriger jährlicher Nutzungszeit auf Strecken geringer Steigung, und die reielektrische Traktion für Strecken großer Verkehrskapazität und hoher jährlicher Benutzungsdauer mit steilen Rampen vom wirtschaftlichen Standpunkt aus geeignet ist (siehe Kurvenblatt 11).

Die Grenzwerte der Verkehrskapazität und der jährlichen Nutzungszeit je Steigung der Strecke zwischen dem Anwendungsgebiet der rein elektrischen und dieselelektrischen Traktion bei der Wahl des Zugförderungssystems gemäß den Kriterien: Kapitalertrag und Rentabilität liegen höher für den Rentabilitätsvergleich als für den Wirtschaftlichkeitsvergleich, wobei diese Grenzwerte umso höhere Werte annehmen je größer das Verhältnis $\frac{r_o}{p}$ ist (siehe Seite 117).

Infolge Schwankungen der jährlichen Nutzungszeit und der Rohenergiepreise kann die wirtschaftliche Überlegenheit des gewählten gegenüber dem anderen fraglichen Traktionssystem umgestürzt werden, wodurch sich die Einführung des betreffenden Betriebes als wirtschaftlich ungeeignet herausstellt. Dies tritt für den Rentabilitätsvergleich bei höheren prozentualen Schwankungen obgenannter Größen ein als für den Wirtschaftlichkeitsvergleich (siehe Seite 121).

Im allgemeinen wird die wirtschaftliche Eignung nicht ausschließlich das Traktionssystem bestimmen: Über die Einführung des elektrischen oder dieselelektrischen Betriebes mögen strategische oder volkswirtschaftliche Gesichtspunkte, z. B. in der Nähe der Bahnlinie vorhandene Wasserkräfte oder Braunkohlenvorkommen, einheimische Dieselöle usw., entscheiden.

In denjenigen Ländern, in welchen sowohl einheimische Treibstoffe als auch elektrische Energie zur Verfügung stehen, und das Bahnggebiet im Falle kriegerischer Verwicklungen voraussichtlich verhältnismäßig unberührt bleibt, entscheidet die wirtschaftliche Eignung über die Wahl des Traktionssystems. Jene Voraussetzungen treffen insbesondere für die Vereinigten Staaten von Nordamerika zu. Die Kriterien der Wirtschaftlichkeit und der Rentabilität beeinflussen in diesem Lande umso mehr die Einführung eines bestimmten Traktionssystems, da dort die Konkurrenz parallel laufender Eisenbahnlinien die Unternehmungen zur äußersten Wirtschaftlichkeit veranlaßt.