

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	65 (1974)
Heft:	5
Artikel:	Hochleistungsmotoren für elektrische Triebfahrzeuge
Autor:	Moser, R. / Pinter, B.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-915362

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Elektrotechnik – Electrotechnique



Hochleistungsmotoren für elektrische Triebfahrzeuge¹⁾

Von R. Moser und B. Pinter

Die Anwendung des Begriffes «Hochleistungsmotor» für Antriebsmotoren in elektrischen Triebfahrzeugen wird unter Berücksichtigung der spezifischen Einsatzarten dieser Fahrzeuge anhand der Geschwindigkeits-Zugkraft-Diagramme erläutert. Ein Überblick über die einschränkenden elektrischen und mechanischen Größen wird gegeben. Die Entwicklung von Lokomotivmotoren wird am Beispiel der Mehrzwecklokomotiven für die Schweizerischen Bundesbahnen und die Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn verfolgt. Auf Vorteile der kollektorlosen Drehstromfahrmotoren wird hingewiesen. Die neuesten Entwicklungen der Leistungselektronik lassen den Bau einer Hochleistungs-Umrichterlokomotive für 16²/3 Hz Netzspeisung in naher Zukunft erwarten.

Der Begriff der Leistung ist physikalisch definiert durch das Produkt aus Kraft \times Geschwindigkeit, meist ausgedrückt in der Einheit «Kilowatt». Der Begriff eines Hochleistungsmotors scheint auf den ersten Blick ebenso eindeutig zu sein – nämlich ein Traktionsmotor hoher Leistung. Diese Deutung ist jedoch zu sehr vereinfacht. Nebst der Leistungsangabe sind z. B. das Verhältnis Nenndrehzahl/Maximaldrehzahl, das Anfahrdrehmoment, die Betriebsweise des Motors und weitere Daten in Betracht zu ziehen.

1. Die Leistungsdefinition von Traktionsmotoren

Für die Erfüllung eines Traktionsprogramms wird vom Motor nicht nur ein einziger Arbeitspunkt verlangt, sondern ein ganzer Arbeitsbereich. Dieser ist übersichtlich im Z - v -Diagramm dargestellt (Fig. 1). Bezogen auf den Motor, unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung und des Raddurchmessers, entspricht Z dem Drehmoment, v der Drehzahl. Die Leistung P (am Rad) in irgend einem Arbeitspunkt A ergibt sich aus dem Produkt der zugehörigen Zugkraft und Geschwindigkeit.

$$P_{A \text{ Rad}} = Z_A \cdot v_A \cdot \frac{1}{3,6}$$

P_A in kW
 Z_A in kN
 v_A in km/h

Die Leistung an der Motorwelle ist um die Getriebeverluste grösser.

$$P_{A \text{ Motor}} = P_{A \text{ Rad}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{Getr.}}} \sim P_{A \text{ Rad}} \cdot 1,025$$

621.335:621.313.13
La notion de «moteur de grande puissance» dans le cas de moteurs d'entraînement d'engins électriques de traction est expliquée en tenant compte des modes d'emploi spécifiques de ces engins, d'après les diagrammes vitesse-effort de traction. Un aperçu des grandeurs électriques et mécaniques limitatives est donné. Le développement de moteurs de locomotives est décrit en prenant comme exemple les locomotives à usages multiples des Chemins de fer fédéraux suisses et du Chemin de fer Berne-Lötschberg-Simplon. Les avantages des moteurs de traction triphasés sans collecteur sont mentionnés. Les développements les plus récents de l'électronique de puissance laissent entrevoir, dans un proche avenir, la construction d'une locomotive de grande puissance à convertisseur de fréquence, pour alimentation à 16²/3 Hz.

Als Hauptabgrenzungen gelten:

- maximale Anfahrgeschwindigkeit = v_{\max}
- maximale Zugkraft = Z_{\max}

Das Produkt beider Maxima ergibt z. B. im Punkt M eine theoretisch grösstmögliche Leistung $Z_{\max} \cdot v_{\max}$; wollte man diese realisieren, so wäre sie nur in einem einzigen Punkt erhältlich. Alle anderen Punkte im schraffierten Arbeitsfeld ergeben kleinere Leistungen. Eine solche Motordefinition ist im allgemeinen nicht sinnvoll. Das Arbeitsfeld wird daher durch eine Kurve begrenzt, die sich durch die Motorcharakteristik bei voller Spannung ergibt, wobei P_{\max} des Motors allgemein kleiner als das Produkt aus $Z_{\max} \cdot v_{\max}$ ist. Bei allen Traktionsmotor-Arten wird der Arbeitsbereich durch eine Anpassung des Hauptfeldes, durch den Feldschwächbereich, erweitert (Kreuz-schraffiertes Gebiet).

Meistens ist ein Fahrzeug mit elektrischer Bremse ausgerüstet. Je nach den Bedingungen der elektrischen Bremse sind Bremsleistungen erforderlich, die sich dem Punkt M' nähern können, was vor allem im Nahverkehr zutrifft. In Fig. 1 beträgt z. B. die grösste Bremsleistung rund das 3,5fache der Dauerleistung. Aufgrund der thermischen Belastbarkeit des Motors kann ein solcher Leistungspunkt nur kurzzeitig gefah-

¹⁾ In diesem Artikel werden für alle Größen die Einheiten des Internationalen Einheitensystems («SI») verwendet. Für die Umrechnung der Einheiten des Technischen Maßsystems in die Einheiten des Internationalen Einheitensystems («SI») gilt die Beziehung:

1 Kraftkilogramm (kg*) = 1 Kilopond (kp) = 9,81 Newton (N)
 1 Tonne (t) = 9,81 Kilonewton (kN)

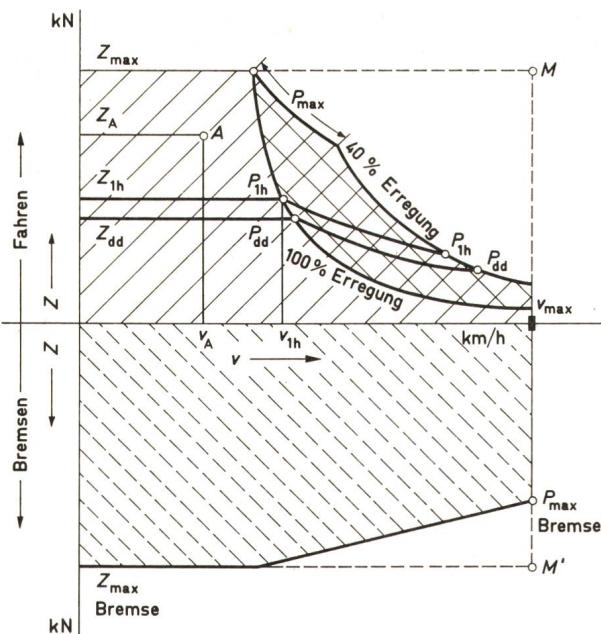


Fig. 1 Z-v-Diagramm eines Traktionsmotors

Z_{\max} max. Zugkraft
 Z_{1h} 1-Stunden-Zugkraft
 Z_{dd} Dauerzugkraft
 $Z_{\max} \text{ Bremse}$ max. Bremskraft
 P_{\max} grösste Leistung Fahren
 P_{1h} 1-Stunden-Leistung ($Z_{1h} \times v_{1h}$)
 P_{dd} Dauerleistung
 $P_{\max} \text{ Bremse}$ grösste Leistung Bremsen

$M Z_{\max} \cdot v_{\max}$ = theoretisch grösstmögliche Fahrleistung
 $M' Z'_{\max} \cdot v_{\max}$ = theoretisch grösstmögliche Bremsleistung
 v_{\max} Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs

ren werden, z. B. beim Kurzstreckenfahrzeug beim Einsetzen der elektrischen Bremse. Kollektormotoren müssen diese Spitzenleistung korrekt kommutieren; ihre Auslegung hat vor allem auch $P_{\max} \text{ Bremse}$ zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der Einsatzart eines Triebfahrzeugs liegt der Arbeitsbereich des Traktionsmotors ganz unterschiedlich im Z-v-Diagramm. Fig. 2 zeigt einige Beispiele:

– Nahverkehr, U-Bahn: Bereiche A und A'

Häufige Anfahrten mit Z_{\max} , Bremsspitzen mit hoher Leistung in der Gegend des Punktes M'. Der Motor arbeitet fast ausschliesslich entweder mit Maximalzugkraft oder Maximaldrehzahl, bei Bremseinsatz häufig mit Maximaldrehzahl und einer Bremskraft, die der Maximalzugkraft entspricht.

– Städte-Schnellverkehr (Intercity): Bereich B

Fahrt mit hoher oder Höchstgeschwindigkeiten, daneben Anfahrten in Intervallen von 20' bis 60'.

– Betrieb auf Bergstrecken mit Mehrzweckfahrzeugen, Bereich C, z. B. Gotthard, Lötschberg, Brenner, Valenciennes–Thionville.

Hier wird hauptsächlich im Bereich der Dauer- oder 1-h-Zugkraft gefahren, entsprechend der thermischen Auslegung des Motors. Die Geschwindigkeit richtet sich nach den Streckenverhältnissen. Anfahrten dürfen sich auf 1 bis 3 pro Stunde beschränken.

– Diesel-Elektrische Übertragung bei verschiedenen Einsatzarten: Bereich D

Der Dieselmotor kann nicht überlastet werden. Die Begrenzungskurve des Z-v-Bereichs ist deshalb eine Hyperbel, entsprechend der verfügbaren Dieselleistung abzüglich Neben- und Hilfsbetriebeleistungen. Die Fahrweise ist gegenüber der Fahrdrähtspeisung hauptsächlich leistungsabhängig.

Zur besseren Übersicht wurden in Fig. 2 alle 4 Bereiche in einem einzigen Z-v-Diagramm mit gleichem Z_{\max} und v_{\max} eingetragen. Es ist selbstverständlich, dass je nach Arbeits-

bereich und Fahrzeugtyp die absoluten Werte für Z_{\max} , v_{\max} sowie die Form der Begrenzungslinien der Diagramme unterschiedlich sein können.

Zunächst wird untersucht, welche Grössen der Z-v-Darstellung die Leistungsdefinition und die Bauart des Motors beeinflussen (Fig. 1 und Fig. 2).

v_{\max} bestimmt n_{\max} des Motors. Diese wiederum ist einschränkenden Bedingungen unterworfen, wie:

- Raddurchmesser und grösstmögliche Getriebeübersetzung;
- Grösstmögliche Umfangsgeschwindigkeit des Kollektors (bei Kommutatormotoren) oder des Rotors allgemein;
- Höchstzulässige Betriebsdrehzahl der Motorlager (Wälzlager).

Entsprechend der Einsatzart, vor allem bei B, Städte-Schnellverkehr, muss beim Kollektormotor die Kommutation auch für den Dauerbetrieb bei Maximaldrehzahl ausgelegt sein.

Z_{\max} bestimmt unter Berücksichtigung von n_{\max} das grösste notwendige Drehmoment und ist damit weitgehend für die mechanische Bemessung des Motors von Bedeutung. Je nach der verlangten Anwendungsdauer (z. B. 10', 30' oder dauernd) ist Z_{\max} auch für die thermische Bemessung des Motors ausschlaggebend.

P_{\max} : Die grösstmögliche Anfahrleistung muss vom Motor je nach Einsatzart häufig bis selten abgegeben werden. Im Fall A, Nahverkehr, ist diese Grösse besonders wichtig, da der Motor bei jeder Anfahrt in diesem Gebiet arbeitet. Die nötige Bremsleistung $P_{\max} \text{ Bremse}$ kann höher als die Anfahrleistung sein.

P_{dd} : Dauerleistung, sie ist zugleich Definitionsleistung und bestimmt die thermische Auslegung des Motors. Je nach Fahrzeugart wird diese Leistung schon bei relativ tiefer Geschwindigkeit erreicht, bei Nahverkehrsfahrzeugen (A) zum Beispiel im Bereich 40 bis 50 % der Maximalgeschwindigkeit. Bei Fahrzeugen für Schnellverkehr (B) und teilweise auch bei Mehrzweckfahrzeugen (C) wird die Dauerleistung erst ab 60 bis 80 % der Höchstgeschwindigkeit erreicht. Sehr im Gegensatz dazu steht das Fahrzeug mit Diesel-Elektrischer Übertragung (D), das beispielsweise seine volle Leistung dauernd bei Anfahrgeschwindigkeiten abgibt.

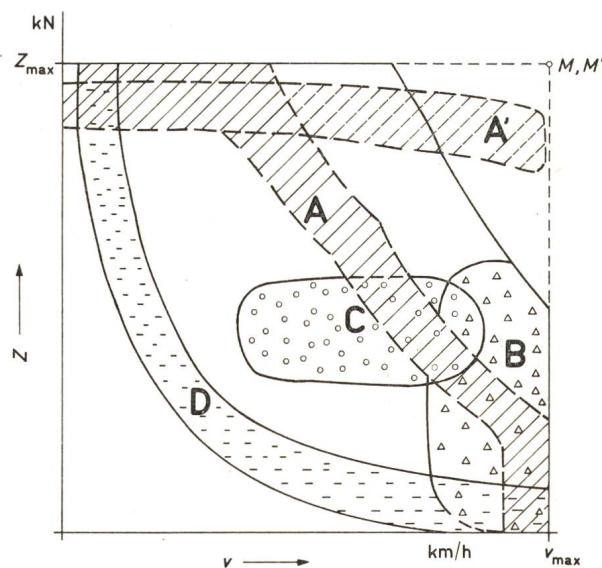


Fig. 2 Z-v-Diagramm für verschiedene Traktionsprogramme

Bereich A: Nahverkehr, U-Bahn: – Fahren
 Bereich A': Nahverkehr, U-Bahn: – elektr. Bremsen

Bereich B: Städte-Schnellverkehr

Bereich C: Betrieb auf Bergstrecken

Bereich D: Dieselelektrische Übertragung, verschiedene Einsatzarten

Größen der jeweiligen Dauerleistung

Tabelle I

Einsatzart	C	D
Motorart	Einphasen-Kollektormotor	Asynchronmotor
Dauerleistung (bei Nennspannung) kW	4×1239	4×250
Dauerzugkraft kN	157	262
entsprechende Geschwindigkeit km/h	111	13,4
Anfahrzugkraft kN	262	262
Höchstgeschwindigkeit km/h	140	85

Die Werte unter C entsprechen 4 Motoren der Re 6/6-Lokomotive der SBB
Die Werte unter D entsprechen 4 Motoren der projektierten Am 6/6-Lokomotive der SBB

kraft abgeben soll und deshalb die Dauerleistung schon bei 16 % der Höchstgeschwindigkeit erreicht.

Fig. 3 zeigt $Z-v$ -Diagramme, die den beschriebenen Fällen A bis D aus Fig. 2 entsprechen. Dargestellt sind jeweils der ganze $Z-v$ -Arbeitsbereich, dick eingetragen die Begrenzung durch die Dauerzugkraft Z_{dd} und markiert der Ort der erreichbaren Dauerleistung. Die Grösse der jeweiligen Dauerleistung ist sehr unterschiedlich. Der Vergleich der Bereiche C und D zeigt dies besonders deutlich. Zur besseren Übersicht sind die wichtigsten Werte in Tabelle I gegenübergestellt.

Das Leistungsverhältnis C:D ist nahezu 5:1. Beide Motortypen haben aber die gleich grosse Anfahrzugkraft von 262 kN abzugeben, was auch für D eine mechanische Dimensionierung im Rahmen von C erfordert. Motor D muss ferner seine Anfahrzugkraft dauernd abzugeben in der Lage sein, was eine entsprechende thermische Dimensionierung der Wicklungen erfordert; demgegenüber hat Motor C im Dauerbetrieb nur 60 % seiner Anfahrzugkraft abzugeben. Bezogen auf die Dauerleistung ist Motor C eindeutig der Hochleistungsmotor. Bezogen auf die Dauerzugkraft ist Motor D aber leistungsfähiger und muss trotz der nur 250 kW betragenden Leistung unter den Begriff «Hochleistungsmotor» gereiht werden. Ähnliche Vergleiche ergeben sich zwischen A und B oder C und B. Motor A ist zum Beispiel durch die Anfahr- und Bremsbedingungen (siehe auch Fig. 2) besonders belastet, Motor B durch die fast dauernd bei Höchstdrehzahl geforderte Leistung.

Damit soll auf die Notwendigkeit hingewiesen werden, dass zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Traktionsmotors stets das geforderte $Z-v$ -Diagramm, der Betriebseinsatz und die Einbaubedingungen zu berücksichtigen sind.

2. Einfluss der verschiedenen Speisearten und der hauptsächlichsten Bauarten auf die Leistungsgrenzen eines Traktionsmotors

Im Einsatzgebiet von Schienenfahrzeugen sind zurzeit und auch in näherer Zukunft folgende Speise-, Motor- und Einbauarten zu berücksichtigen:

- Gleichstrom, ab Fahrleitung oder ab Generator der Diesel-Lokomotive. Gleichstrom-Kollektormotor.
- Wellenstrom verschiedener Form, aus Dioden- oder Thyristor-Stromrichtern oder aus Zerhakkern bei Gleichstrom. Mischstrom-Kollektormotor.
- Einphasen-Wechselstrom: Einphasen-Wechselstrom-Kollektormotor.
- Mehrphasenstrom: rotierender kollektorloser Motor oder Linearmotor.

Als grobe Unterteilung bezüglich Einbauarten kann spezifiziert werden:

- Einbau von 1 Motor pro Achse in Querrichtung des Drehgestells.
- Einbau von 1 Motor pro Drehgestell, im Drehgestell (längs oder quer).
- Einbau von 1 Motor pro Drehgestell, auf dem Drehgestell.
- Linearmotor (nur mit Speisung d).

Sowohl die einzelnen Stromarten wie auch die hauptsächlichen Einbauarten weisen individuell gewisse Grenzen auf, die für die Leistung bzw. für die mögliche Baugröße eines Traktionsmotors ausschlaggebend sind. In Tabelle II sind diese zusammengestellt. Man erkennt, dass keine Speisearten und keine Einbauarten ohne Einschränkungen bestehen. Die grösste Anzahl Einschränkungen (total 6) weist der Einphasen-Kollektormotor (c) mit Einbauart quer (e), die der Praxis am meisten entspricht, auf. Die kleinste Anzahl Einschränkungen zeigt der Mehrphasen-Linearmotor, wobei allerdings die zulässige Masse eine wesentliche Rolle spielt, sowie der hier nicht diskutierte Aufwand für die Energieumformung auf dem Fahrzeug.

3. Entwicklungsstufen eines Hochleistungsmotors für Mehrzweck-Lokomotiven

Im Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass der Einphasen-Kollektormotor in der Einbauart quer (1 Motor pro Achse), die grösste Zahl einschränkender Bedingungen aufweist. Das Verfolgen seiner Entwicklung ist deshalb besonders aufschlussreich. Ausserdem wird diese Motorart nach wie vor von mehreren

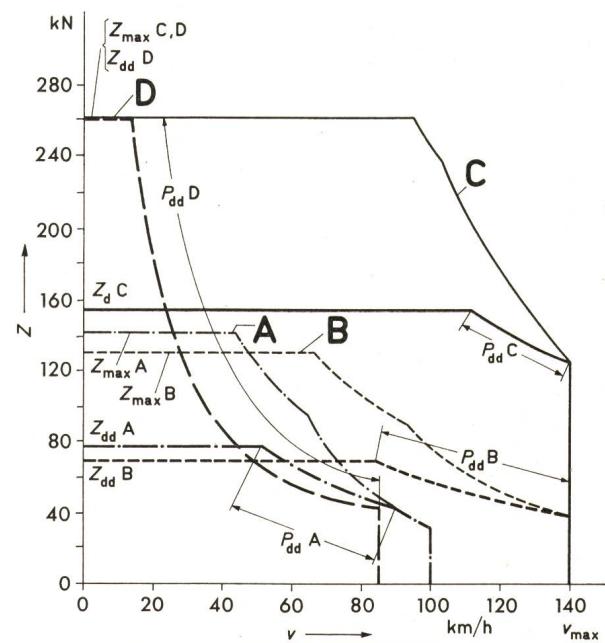


Fig. 3 Beispiele von $Z-v$ -Diagrammen für Triebfahrzeuge verschiedener Zweckbestimmung

Pro Fahrzeug 4 angetriebene Achsen mit höchstens 196 kN Achslast

Einsatzart	Fahrzeugart	Dauerleistung an den Motorwellen bei Nennspannung kW
A: - - - Nahverkehr U-Bahn	Triebwagen	4×280
B: - - - Städte-Schnellverkehr	Triebwagen	4×415
C: —— Allzweckfahrzeug	Lokomotive	4×1239
D: - - - Dieselelektrisches Fahrzeug	Lokomotive	4×250

← P_{dd} → Ort der erreichbaren Dauerleistung

ren europäischen Bahngesellschaften in grossem Umfang eingesetzt [1; 2; 3; 9]²⁾.

Am Beispiel von Lokomotiv-Motoren der AG Brown, Boveri und Cie. (BBC) für die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sollen einzelne Entwicklungsphasen auf dem Weg zu immer grösseren Definitionsleistungen erläutert werden.

Obwohl die Entwicklung eine Zeitspanne von knapp 20 Jahren umfasst sowie 3 Lokomotiv-Haupttypen, nämlich Ae 6/6 [3], Re 4/4 II [2], Re 6/6 [1], betrifft, sind wesentliche Randbedingungen unverändert geblieben:

Stromart (c): Einphasen-Wechselstrom $16\frac{2}{3}$ Hz, Speisung über Stufentransformator.

Als spezielle Bedingung ist einzuhalten: Begrenzung des Flusses pro Pol, so dass die in den kommutierenden Windungen induzierte transformatorische Spannung bei 1-h-Strom, höchstens 3 V (unkompensiert) beträgt.

Einbauart (e): 1 Motor pro Achse in Querlage, fest im Drehgestell eingebaut.

Fig. 4 zeigt die Platzverhältnisse im Drehgestell, wie sie bei einer modernen, zusätzlich mit Tiefzuganlenkung ausgerüsteten Normalspur-Lokomotive [2; 1; 13], anzutreffen sind.

Die Normalspur ergibt eine nutzbare Einbaulänge von 1360 mm zwischen den Radreifen. Dieser Wert wird durch die Motor-Länge, die Dimensionen des elastischen Antriebs sowie durch die Beweglichkeit des Radsatzes (Querverschiebung, Schieflage und nötiges Einbauspiel) in Anspruch genommen. Für den Motor bleibt ein Netto-Längenmass von etwas weniger als 1000 mm übrig.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Im Zusammenhang mit der notwendigen und erreichbaren Übersetzung des einstufigen Stirnradgetriebes ergibt sich ein Höchstmass für den Motor-Aussendurchmesser von 1130 mm.

Die Begrenzung der Achslast auf 196 kN gibt rückwirkend für den Motor eine Beschränkung der Motormasse auf 3900 kg, die um so eher eingehalten werden muss, je höher die Leistung des Fahrzeugs ist und mit ihr auch die Masse der übrigen Fahrzeug-Ausrüstungsteile.

Der einbaubereite Motor für ein solches Fahrzeug, am Beispiel der Re 6/6-Lokomotive der SBB, ist in Fig. 5 abgebildet. Gut sichtbar sind die Einbauflächen sowie die Anbauflächen für das Getriebe.

Zusammen mit den angebauten Luftzuführungs-Verschaltungen, dem Klemmenkasten und dem Achsschutz ergibt sich ein recht kompliziertes Gebilde. Dieses muss im beschränkten Einbauraum innerhalb des Drehgestells unter Berücksichtigung aller Relativbewegungen zwischen Lokomotivkasten, Drehgestell und Radsatz, eingebaut werden.

Tabelle III zeigt die Hauptdaten der einzelnen Entwicklungsphasen. Zur besseren Übersicht ist ein Auszug der wichtigsten Daten in Fig. 6 graphisch dargestellt. Auffallend ist die Steigerung der 1-h-Definitionsleistung, die durch Erhöhung des Drehmoments M_d und der Drehzahl n zustande kommt. Für die Zeitspanne 1955/1972 beträgt die Erhöhung 82 %. Da die Masse m nahezu unverändert blieb, erhöhte sich auch die spezifische Leistung entsprechend, nämlich von 0,192 kW/kg auf 0,345 kW/kg. Aufgrund der im Abschnitt 1 diskutierten Beobachtungsweise sind auch andere Punkte des $Z-v$ -Diagramms zu berücksichtigen. Im vorliegenden Fall interessiert speziell diejenige Motorleistung, welche bei der höchsten Transfor-

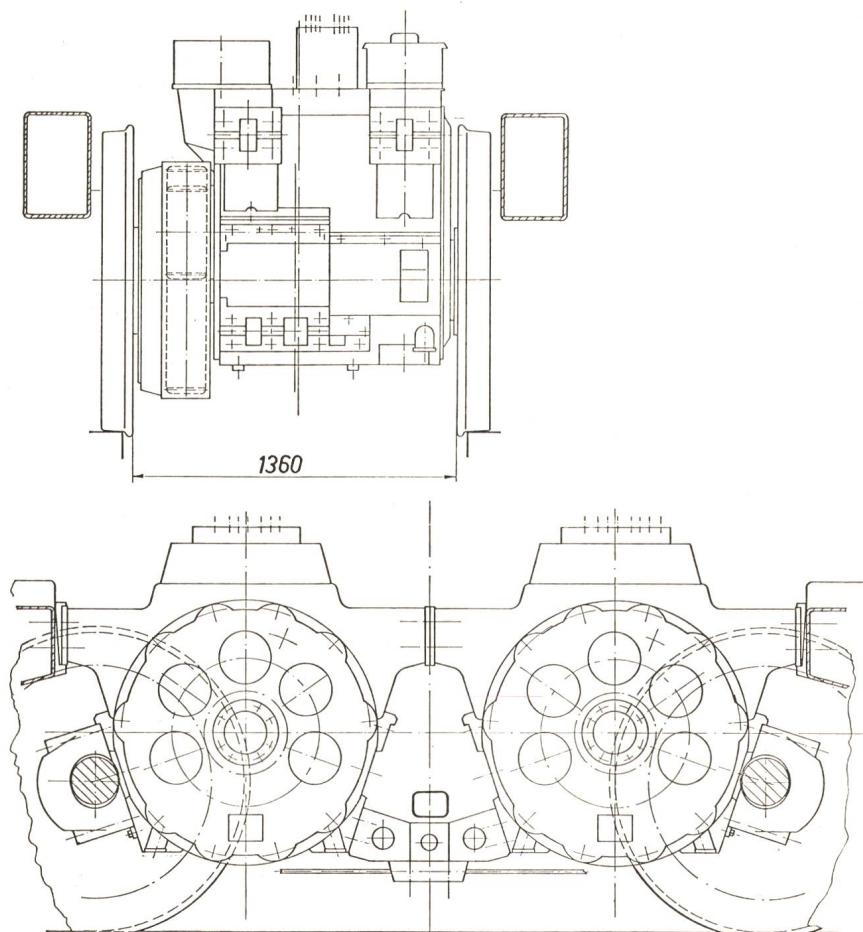


Fig. 4

Platzverhältnisse im Drehgestell einer modernen Normalspur-Lokomotive mit Tiefzuganlenkung

Bedingung	Einbauart	a	b	c	d	e	f	g	h
		Gleichstrom	Wellenstrom	Einphasen-Wechselstrom	Mehrphasenstrom	1 Motor pro Achse, quer	1 Motor pro Drehgestell im Drehgestell	1 Motor pro Drehgestell auf dem Drehgestell	Linear-motor
Thermische und elektrische Belastbarkeit des Kollektors		x	x	x					
Fluss pro Pol				x					
Thermische Belastbarkeit der Wicklungen entspr. der Isolationsklasse		x	x	x	x				
Begrenzung Motorlänge durch Spurweite, Motordurchmesser durch Getriebe						x	x		
Begrenzung Motorlänge durch Drehgestell-Abmessungen						x	x		
Begrenzung Motorlänge durch Fahrzeugabmessungen								x	x
Motor-Masse, Begrenzung durch vorgeschriebene grösste Achslast						x	x	x	x

torstufe bei Fahrdraht-Nennspannung und bei Maximaldrehzahl des Motors abgegeben wird.

1955: 615 kW bei 1380 U./min (Ae 6/6)
1972: 1310 kW bei 1600 U./min (Re 6/6)

Die Steigerung beträgt in diesem Fall 113 %, wobei zu berücksichtigen ist, dass diese mehr als verdoppelte Leistung bei erhöhter Drehzahl abgegeben werden muss, was beim Kollektormotor entsprechende Anforderungen an die Kommutation stellt.

Fig. 7 zeigt die Überlagerung der $Z-v$ -Diagramme von Motoren verschiedener Entwicklungsstufen, wobei auch das Diagramm des Mischstrom-Hochleistungsmotors mit einbezogen ist.

Da es sich bei den Lokomotiven wechselweise um 4- und 6achsige Typen handelt, ist das Diagramm einheitlich für 1 Motor dargestellt, wobei aber die Spannungsverhältnisse der jeweiligen Fahrzeuge berücksichtigt sind.

Die Tendenz zu höherer Leistung, bzw. Zugkraft bei hoher Geschwindigkeit ist augenfällig. Wird beispielsweise bei $v = 120$ km/h ein Vergleich der Zugkräfte gemacht, so erhält man bei der Ae 6/6 18,6 kN, bei der Re 6/6 im Feldschwächbereich 44,5 kN, d.h. 140 % mehr! Die Steigerung der Zugkraft bei Höchstgeschwindigkeit (140 km/h) zum Beispiel von 22 kN bei der Re 4/4 II auf 32,7 kN bei der Re 6/6 lässt sich hauptsächlich durch die erstmals bei Einphasen-Wechselstrom-Motoren eingeführte Feldschwächung realisieren.

Anschliessend sollen die Mittel erwähnt werden, welche die gezeigte Entwicklung der Leistungen in der Zeitspanne 1955–1972 überhaupt ermöglichen.

a) Erhöhung der Definitions-Drehzahl:

Durch Verbesserung der Kommutierungseigenschaften, insbesondere durch die Verwendung einer 2fach-Schleifenwicklung, die einen grösseren Fluss pro Pol zulässt und gleichzeitig eine Reduktion der Polzahl erlaubt [6].

b) Erhöhung der Maximaldrehzahl:

Einerseits dank des Gewinns unter a), anderseits durch eine verbesserte Lagerung und Schmierung sowie strengere Anforderungen an die Kollektor-Rundlauf-Qualität.

c) Anwendung der Feldschwächung auch beim Einphasen-Kollektormotor.

d) Höhere thermische Ausnutzung der Wicklungen:
Übergang von Isolationsklasse B auf F, später auf H. Über die detaillierte Entwicklung sei auf die Fachliteratur hingewiesen, insbesondere [7; 8].

e) Einsparungen an Masse an jedem möglichen Ort, um ein Maximum an Masse für den Aktivteil verwenden zu können.

Zum Abschluss der Betrachtungen, die vorwiegend dem Einphasen-Wechselstrommotor gelten, sei auf einen modernen Mischstrom-Motor hingewiesen, der den am Anfang des Abschnittes 3) aufgezählten Randbedingungen entspricht. Es han-

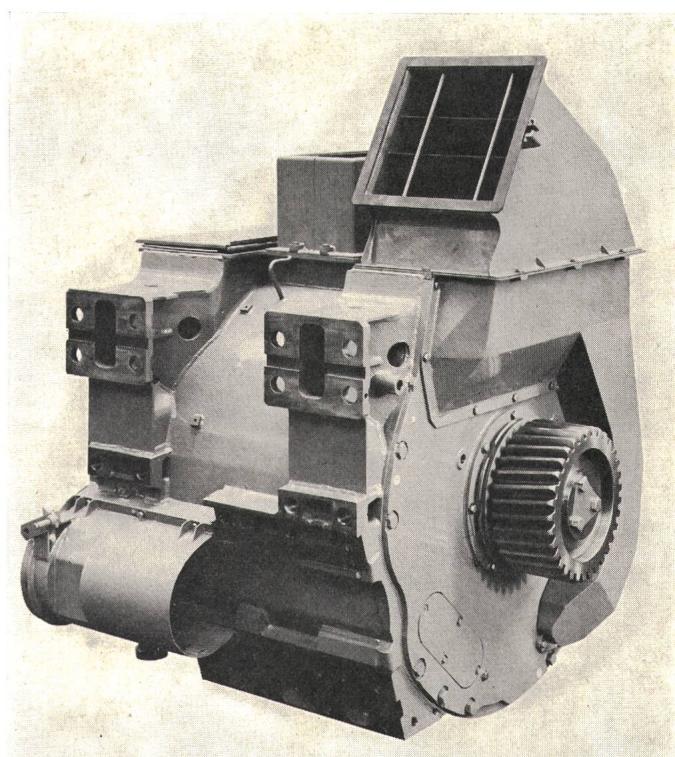


Fig. 5 Einbaubereiter Fahrmotor

Typ 12 FHW 7659 zu Lokomotive Re 6/6 der SBB

Lokomotiv-Typ	Ae 6/6 der SBB		Re 4/4 II der SBB Prototyp 10 HW 895 $1\sim/16\frac{2}{3}$ Hz	Re 4/4 II (Re 4/4 III) Serie 10 HW 895 $1\sim/16\frac{2}{3}$ Hz	Re 6/6 der SBB Prototyp 12 FHW 7659 $1\sim/16\frac{2}{3}$ Hz	Re 4/4 der BLS	
	1. Serie ELM 982 St ¹⁾ $1\sim/16\frac{2}{3}$ Hz	Serie ELM 982 St $1\sim/16\frac{2}{3}$ Hz				3. Serie GRLM 763 St Wellenstrom/ $16\frac{2}{3}$ Hz	
	1955 ¹⁾	ab 1962				1972	1972
Motormasse	kg	3830	3830	3860	3900	(Re 4/4 III)	3880
v_{max} der Lokomotive	km/h	125	125	140	140	(125)	140
Raddurchmesser neu	mm	1260	1260	1260	1260		1250
Übersetzung	1:	2,56	2,56	2,64	2,64	(3,11)	2,64
Polzahl/Wicklungsart		14/Schleife	14/Schleife	10/2fach-Schleife	10/2fach-Schleife	12/2fach-Schleife	8/Schleife gespalten
Transformatorische EMK im Stundenpunkt	V	2,7	2,9	2,8	3,0	2,6	—
Isolationsklasse	Anker/Stator	B/B	F/F	F/F	H/F	H/H	H/F
Grenzerwärmung Δt :	— Anker	0°C	120	140	160	160	160
	— Kollektor	0°C	105	105	105	105	105
	— Stator	0°C	130	155	155	180	155
Stunden/Dauerleistung (Welle)	kW	735/660	850/760	1030/955	1195/1113	1338/1239	1245/1185
Drehzahl bei Stunden/Dauerleistung	1/min	820/875	800/860	1140/1200	1145/1195	1205/1265	1140/1160
Maximale Drehzahl	1/min	1380	1380	1600	1600 (1685)	1600	2040
Leistung bei n_{max} und höchster Stufe des Fahrzeugtransformators	kW	615	615	910	910 (895)	1310 (Feldschwächung)	750 (Feldschwächung)
Stunden/Dauer-Drehmoment	Nm	8560/7203	10147/8440	8630/7600	9967/8895	10604/9354	10430/9756
Maximales Drehmoment	Nm	16475	16475	15347	15347	15790	15985
Nennspannung	V	390	420	500	525	560	1030
Stunden/Dauerstrom	A	2120/1900	2300/2040	2250/2080	2485/2300	2600/2400	1300/1230
Erwärmung bei Stundenleistung Δt :	— Anker	0°C	95	102	112	145	136
	— Kollektor	0°C	50	55	65	85	70
	— Feld	0°C	95	95	86	105	112
	— Wendepol	0°C	90	80	72	90	80
	— Kompensation	0°C	105	110	104	105	98

¹⁾ Ein ähnlicher Motor gleicher Leistungsdaten kam bereits 1944 auf den Ae 4/4-Lokomotiven des BLS, Nr. 251 und 252 zum Einsatz [9].

delt sich um den Motor GRLM 763 St der Lokomotive Re 4/4 der BLS (Berner Alpenbahngesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon), dessen Daten in der letzten Spalte der Tabelle II aufgeführt sind. Ein Quervergleich zeigt, dass teilweise Übereinstimmung zwischen einzelnen Daten besteht.

Im speziellen seien zwei Werte mit dem Re 6/6-Motor verglichen:

a) 1-h-Drehmoment:

Die beiden Werte sind annähernd gleich (10604 Nm, bzw. 10430 Nm), wobei der Mischstrommotor eine Mindermasse von 240 kg gegenüber dem Einphasen-Motor aufweist. Diese Massereduktion entspricht der Tatsache, dass sich der Mischstrommotor bezüglich Fluss und dem damit verbundenen Drehmoment höher ausnützen lässt als der Einphasenmotor.

b) Spezifische Leistung bei 1-h-Betrieb:

Mischstrom-Motor Re 4/4 : 0,342 kW/kg
Einphasenmotor Re 6/6 : 0,345 kW/kg

Diese Zahlen dürfen aber nur im Zusammenhang mit dem Verhältnis der Definitionsrehzahl zur Maximaldrehzahl betrachtet werden.

Dieses beträgt 0,55 bei der Re 4/4 0,75 bei der Re 6/6

Der vorliegende Mischstrommotor ist also relativ tiefer definiert und erreicht aus diesem Grunde keine höhere spezifische Leistungszahl als der Motor der Re 6/6, wie dies sonst zu erwarten wäre.

Die Überlegungen zeigen, dass sich die am Modell des Einphasenmotors beschriebenen Entwicklungen auch auf andere Motortypen beziehen können, da keine grossen Unterschiede in den Hauptdaten bestehen.

4. Lösung einzelner Probleme für Hochleistungsmotoren

4.1 Isolationstechnik

Für die Ausnutzung und den sicheren Betrieb eines Bahnmotors ist die Isolationstechnik von entscheidender Bedeutung [7; 8]. Für die Zeitstandfestigkeit eines Isolationssystems sind dessen Eigenschaften bezüglich Alterung und Widerstandskraft gegen thermomechanische Beanspruchungen sowie seine Unempfindlichkeit auf Schmutz- und Feuchtigkeitseinwirkungen massgebend.

Für die thermische Ausnützbarkeit bestehen Regeln, die zum Beispiel in der CEI-Publikation 349, Ziffer 31, für Traktionsmaschinen festgehalten sind.

So gelten für Ankerwicklungen folgende Grenzerwärmungen:

Klasse B: 120 °C, Klasse F: 140 °C, Klasse H: 160 °C

Diese Zahlen repräsentieren aber nur indirekt die Ausnutzungsmöglichkeit der Maschine; je nach Isolationsklasse wer-

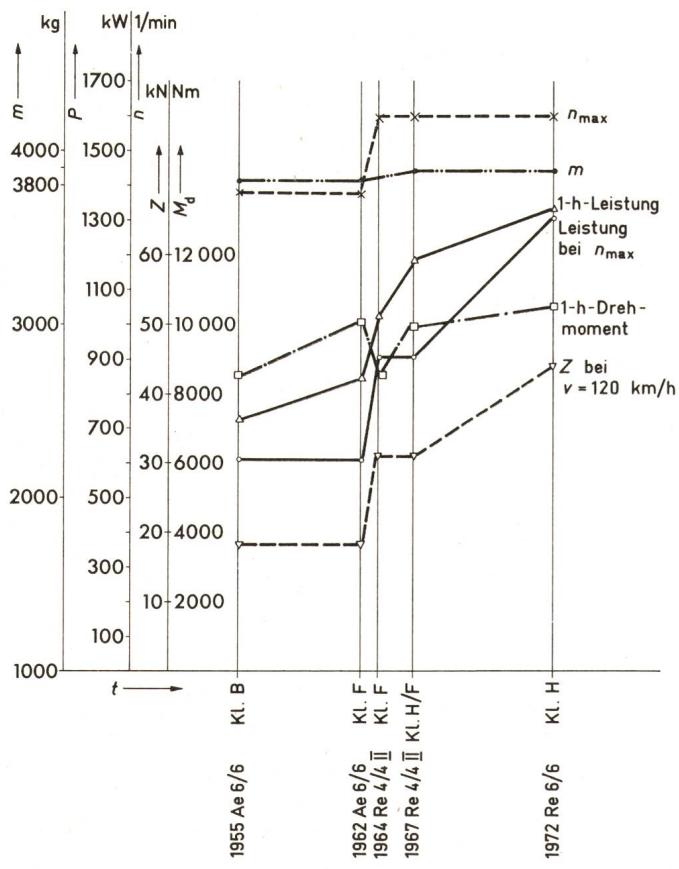


Fig. 6 Entwicklung des 16^{2/3}-Hz-Einphasen-Lokomotivmotors der SBB-Triebfahrzeuge

Auszug aus Tabelle III und Fig. 6

m Masse

t Zeit (Jahr)

Z Zugkraft pro Motor

M_d Drehmoment an der Motorwelle

n Drehzahl

P Leistung

Weitere Erklärungen siehe im Text

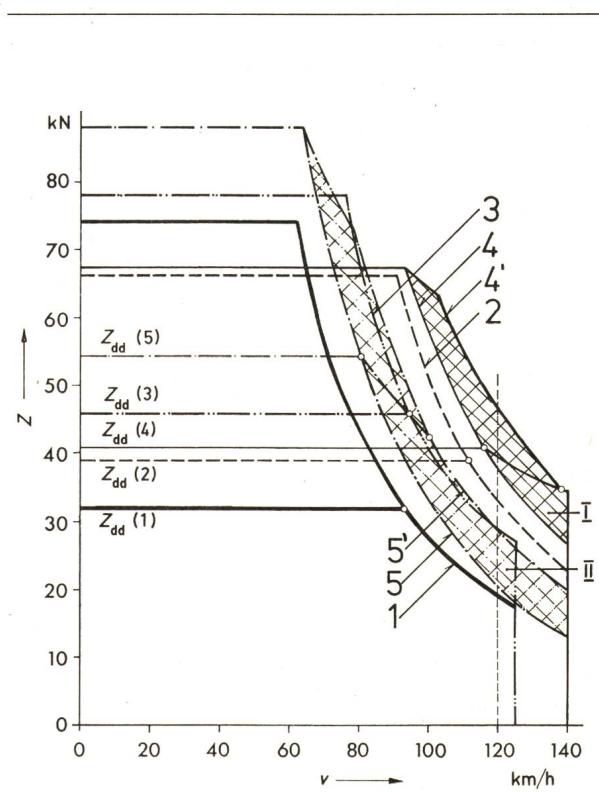


Fig. 7 Z-v-Diagramm des 16^{2/3}-Hz-Einphasen-Lokomotivmotors verschiedener Entwicklungsstufen

1 1955 Ae 6/6

2 1964 Re 4/4 II

3 1964 Re 4/4 III

4 1972 Re 6/6, 4' mit Feldschwächung

5 1965 Re 4/4 BLS, 5' mit Feldschwächung

Z Zugkraft

Z_{dd} die den einzelnen Motoren zugehörigen Dauer-Zugkräfte

v Geschwindigkeit

I Feldschwächebereich der Re 6/6 SBB

II Feldschwächebereich der Re 4/4 BLS

Benennung	1-h-Strom A	1-h-Strom relativ %	Erwärmung der Anker- wicklung Δt °C	Grenz- erwärmung der Isolations- klasse Δt °C	Reserve bezüglich Grenz- erwärmung °C
<i>a) Motor der Ae 6/6 (Anker)</i> Übergang Klasse B – Klasse F					
1. Definition Klasse B	2120	100	95	120	25
2. Definition Klasse F	2300	108,5	102	140	38
3. Extrapolation Klasse F (für 25 °C Reserve)	2440	115	115	140	25
<i>b) Motor der Re 4/4 II (Anker)</i> Übergang Klasse F – Klasse H					
4. Definition Klasse F	2250	100	112	140	28
5. Extrapolation Klasse F für 15 °C Reserve	2375	105,5	125	140	15
6. Definition Klasse H	2485	110,5	145	160	15

den unterschiedliche Isoliermaterialien verwendet, die teilweise verschiedene Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. So ist bekannt, dass die mit Kunstharz im Vakuum imprägnierten Isolationen der Klasse F eine bedeutend bessere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die früher mit lösungsmittelhaltigen Lacken behandelten Materialien der Klasse B. Dieser Vorteil zeigte sich besonders am Motor der Ae 6/6 beim Übergang von Klasse B auf Klasse F. Beim späteren Übergang von Klasse F auf Klasse H (Motor der Re 4/4 II) war man bedacht, die günstigen Wärmeleitwerte der Klasse F beizubehalten. Zu verbessern waren sie aber mit Materialien der Klasse H nicht weiter.

Tabelle IV zeigt für die Beispiele:

- a) Motor der Ae 6/6 Übergang von Isolationsklasse B auf F
b) Motor der Re 4/4 II Übergang von Isolationsklasse F auf H
die realisierten Strom-, bzw. Leistungsgewinne bei unveränderter Spannung. Aus verschiedenen Gründen wird eine Temperaturreserve auf die zulässige Grenzerwärmung eingehalten. Da die für Vergleichszwecke möglichen Leistungsgewinne nur je auf gleicher Erwärmungsbasis ermittelt werden können, müssen zusätzliche extrapolierte Werte zu Hilfe genommen werden. Die Resultate zeigen sich wie folgt:

– Motor der Ae 6/6, Übergang von Klasse B zu F

Bei unveränderter Reserve von 25 °C ist eine Steigerung des 1-h-Stromes um 15 % möglich (Tabelle IV, Zeile 1 zu 3). Dieser Gewinn liegt zum grösseren Teil in der Technik der Isolationsmaterialien der Klasse F mit lösungsmittelfreier Imprägnierung begründet, zum kleineren Teil in der Erhöhung der Erwärmungsgrenze um 20 °C. Für die Definition in Klasse F wurden aber nur 8,5 % des möglichen Gewinns ausgenutzt, da die übrige bestehende Lokomotiv-Ausrüstung zu berücksichtigen war.

– Motor der Re 4/4 II, Übergang von Klasse F zu H:

Bei gleicher Reserve von 15 °C ist eine Steigerung des 1-h-Stromes um 5 % möglich (Tabelle IV, Zeile 5 zu Zeile 6). Hier kommt nur die Erhöhung der Grenzerwärmung um 20 °C zur Auswirkung, da die Wärmeleitfähigkeit der Klasse H-Isolation «1964» höchstens gleich gut war wie diejenige der Klasse F.

Über die Isolation der Klasse H seien an dieser Stelle noch einige Ausführungen gemacht:

Die ersten Isolationssysteme der Klasse H weisen gegenüber der Klasse F eine etwas geringere Wärmeleitfähigkeit auf.

Durch die Einführung besonderer Techniken und Verwendung von lösungsmittelfreien Silikonharzen [8] konnten für die neu entwickelten Isolationssysteme die Wärmeleitwerte der Klasse «F»-Systeme nahezu erreicht werden, so dass heute die erhöhte Grenzerwärmung der Klasse H voll ausgenutzt werden kann. Fig. 8 zeigt Wärmeleitfähigkeiten von Isolationssystemen, wie sie auch für Ankerisolationen Anwendung finden. Der Unterschied F/H, d.h. Epoxidharz/Silikonharz ist sehr klein und wirkt sich im ganzen Temperaturgefälle vom Kupfer bis zur Kühlluft schlussendlich nur unbedeutend aus.

Neben dem erzielten Leistungsgewinn von 5 bis 6 % ergeben die Materialien der Klasse H aber noch weitere wesentliche Vorteile:

– Sicherheit gegen Kriechwegbildung

Bei örtlicher thermischer Überlastung von Silikonprodukten entstehen nichtleitende Silikatrückstände, im Gegensatz zu leitenden Rückständen anderer Produkte.

– Alterungsbeständigkeit des Isolationsverbandes

Silikonprodukte zeigen bei Alterung mit erhöhten Temperaturen eine ausserordentlich gute Alterungsbeständigkeit.

Fig. 9 zeigt die bei forciertter Alterung im Laboratorium gemessenen Durchschlagsspannungen in Funktion der Alterungszeit.

Bei einer Temperatur von 220 °C fällt der Wert der Durchschlagsspannung nach einer Alterungszeit von 26 Wochen auf 70 % ab. Gegenüber Materialien, die nicht zur Klasse H gehören, ist dieser Abfall kleiner. Selbst bei forciertter Alterung mit einer Temperatur von 280 °C sinkt dieser Wert nicht unter 65 %. Dies bedeutet, dass Materialien der Klasse H nicht nur eine um 20 °C höhere Grenzerwärmung zulassen, sondern zugleich eine verlangsamte Alterung oder eine sehr hohe Überlastbarkeit aufweisen. Eine ausserordentliche thermische Überlastung eines in Klasse H isolierten Motors bis 280 °C verursacht noch keinen Schaden.

4.2 Der Feldschwächbetrieb bei Einphasen-Wechselstrom-Motoren

Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge benötigen auch in der Nähe der Maximalgeschwindigkeit ihre Definitions-Leistung. Eine normale Serie-Charakteristik ergibt aber nur Teil-Leistung, so

Trägermaterial	Imprägnierharz	Wärmeleitfähigkeit
		0 20 40 60 80 % 100

Fig. 8
Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Isolationssysteme, gemessen an 3 mm dicken Platten

Glimmervlies-Glasgewebe	Epoxidharz	
-------------------------	------------	--

Nomex M	Epoxidharz	
---------	------------	--

Glimmervlies-Glasgewebe	Silikonharz 2	
-------------------------	---------------	--

Nomex M	Silikonharz 2	
---------	---------------	--

dass allgemein zu einer Anpassung der Erregung gegriffen werden muss. Das Prinzip ist als Feldschwächung längst bekannt. Es ergibt im $Z-v$ -Diagramm einen zusätzlichen Betriebsbereich (Fig. 1). Neu ist die Anwendung bei Einphasen-Wechselstrom-Motoren. Die Auswirkung für den Fall der Re 6/6-Lokomotiven zeigt Fig. 7. Bei 120 km/h werden ohne Feldschwächung $6 \cdot 36,85 = 221$ kN Zugkraft abgegeben, mit Feldschwächung $6 \cdot 44,5 = 267$ kN. Die Leistung am Rad pro Motor steigt dabei von 1210 kW auf 1485 kW (bei 15 kV und oberster Fahr-

stufe). Diese Leistung kann während 30 min abgegeben werden (1-h-Leistung am Rad: 1310 kW).

Aus Fig. 7 ist ferner ersichtlich, dass bei $v_{max} = 140$ km/h praktisch die Dauerzugkraft, entsprechend dem Dauerstrom des Motors $I = 2400$ A, gefahren werden kann, was den Leistungsanforderungen für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge entspricht.

Für den Feldschwächbetrieb sind zwei für den Einphasen-Wechselstrommotor zusätzliche Erfordernisse zu erfüllen:

a) Die Feld-Shuntung muss Ohmisch-induktiv erfolgen, wobei der Erregungsgrad nicht durch die Ohmische, sondern in erster Linie durch die induktive Komponente des Shunts gegeben ist. Eine genügend grosse Induktivität ist erforderlich.

b) Die Beschaltung des Wendepols muss so verändert werden können, dass die Kompensation der Transformationsspannung einerseits der erhöhten Drehzahl, andererseits dem reduzierten Hauptfluss angepasst wird.

Fig. 10 zeigt die Prinzipschaltung der SBB-Lokomotive Re 6/6 [1]. Hier wird der Punkt a) dadurch ermöglicht, dass die benötigten Induktivitäten bereits in Form der Bremsdrosselspulen zur Verfügung stehen. Punkt b) wurde durch eine Umschaltung im Wendepolkreis ermöglicht. Parallel zur Wendepolwicklung W liegt der erste Ohmische Shunt R_{W1} , dazu in Serie der Primärteil eines kleinen Anpass-Transformators. Im Sekundärkreis des Transformators befindet sich R_{W2} sowie Schalter S. Im Vollfeldbetrieb ist Schalter S geschlossen, der Shunt-Kreis des Wendepols hat hauptsächlich Ohmischen Charakter. Bei Feldschwächung wird S geöffnet; nun kommt die Induktivität des offenen Anpasstransformators zur Wirkung und erzwingt eine höhere Kompensations-Drehzahl des Motors. Die beiden sich ergebenden Kompensationsdrehzahlen sind durch die Grösse der Kopplung des Anpasstransformators in einem gewissen Bereich beeinflussbar. Ferner kann durch die geschwindigkeitsabhängige Steuerung des Schalters S das Umschalten auf die obere Kompensationsdrehzahl dem praktischen Betriebseinsatz angepasst werden.

4.3 Einsparungen an Masse

Die Einsparung an Masse bei jedem Bauelement ist erstes Erfordernis für Hochleistungsmotoren. Es können 3 Hauptgruppen unterschieden werden:

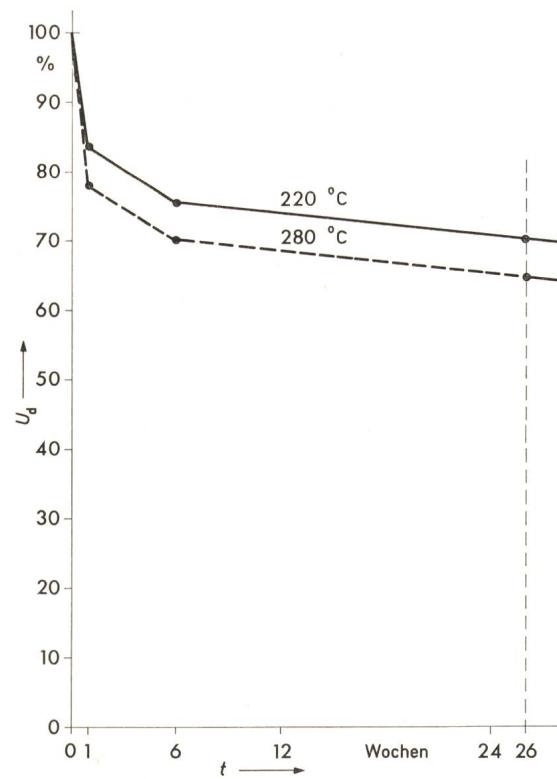


Fig. 9 Durchschlagsspannungen von Isoliermaterialkombinationen in Funktion der Alterung

Isolationsverband, Klasse H (Glas-Glimmervlies-Silikon)
220 °C, 280 °C: Alterungstemperaturen

t Alterungszeit

U_d Durchschlagsspannung in % des Neuzustandes

		Ae 6/6	Re 4/4 II	Re 6/6
1-h-Leistung	kW	735	1195	1 338
1-h-Drehmoment	Nm	8560	9967	10 604
Schleuderdrehzahl	1/min	1720	2000	2 000
Hauptmasse Aktivteil				
Ø × Länge	mm	930 × 280	820 × 380	860 × 390
Hauptmasse Kollektor				
Ø × Länge	mm	650 × 208	590 × 258	655 × 258
Welle		Nicht auswechselbar	Auswechselbar	Zapfen auswechselbar
Ankerkörper		Gusskörper	Schweisskonstruktion	Verbundkonstruktion
Ankermasse	kg	1550	1645	1580

a) Elektrischer Aktivteil:

Die Einsparung erfolgt durch höchstmögliche Ausnützung in thermischer und magnetischer Hinsicht.

b) Mechanische Übertragung (Welle, Lagerung):

6) Mechanische Übertragung (Weile, Lagerung).
Einsparungen können durch geeignete Formgebung und Materialwahl erfolgen.

c) Sekundäre Teile (Verschalungen, Halterungen):

Alles Prinzipielle, die Entstehung, die Abläufe und die Ergebnisse der Entwicklung der Materialien und deren Anwendung in der Praxis.

Als Beispiel soll die Entwicklung am Ankerkörper des Einphasen-Lokomotivmotors dargestellt werden.

Zur Beurteilung werden in Tabelle V elektrische und mechanische Daten, insbesondere auch die Hauptabmessungen des Aktiveils und des Kollektors der jeweiligen Ankermasse gegenübergestellt. Man erkennt, dass bei fast gleicher Gesamtmasse grössere Leistung, grösseres Drehmoment, erhöhte Schleuderdrehzahl und grössere Aktiv-Volumina bewältigt werden, wobei gleichzeitig die Auswechselbarkeit der Welle, bzw. des antriebseitigen Wellenzapfens ermöglicht wird.

In Fig. 11 sind die Längsschnitte der drei verschiedenen Ankerkörper sichtbar.

Fig. 11a, Motor der Ae 6/6, zeigt das Beispiel eines gegossenen Hohlkörpers als Träger für den Aktivteil. Er dient mit seinen Verlängerungen zugleich als Welle. Die bestechend einfache Konstruktion stellt einige Anforderungen an die Qualität des Stahlgusses. Aus technologischen Gründen ist ferner die Möglichkeit zu Masse-Einsparungen begrenzt. Bei Beschädigung der Wellenenden muss eine örtliche Reparatur der Schadstellen erfolgen können.

Fig. 11b zeigt eine Lösung, bei der eine Welle, die masseparend ausgebildet ist, in einen geschweißten Ankerkörper eingepresst ist. Die Konstruktion hat den Vorteil, dass eine beschädigte Welle ausgepresst und durch eine neue ersetzt werden kann (Motor der Re4/4 II).

Fig. 11c zeigt schliesslich die für den Motor der Re 6/6 gewählte Verbund-Konstruktion: Ankerkörper aus Stahlguss-, Schmiede- und Blechteilen zusammengeschweisst. Das besonders gefährdete antriebeseitige Wellenende ist abschraubbar. Falls es beschädigt wird, kann es in kurzer Zeit durch ein neues oder aufgearbeitetes Element ersetzt werden. Diese Lösung ergab für den betreffenden Anker das Minimum an Masse. Andere Elemente des Motors, z. B. der Stator, wurden auf ähnliche Art zur leichtesten möglichen Konstruktion optimiert.

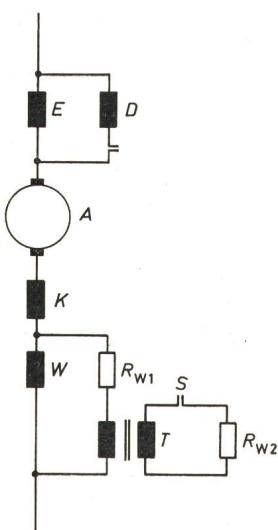


Fig. 10 Einphasen-Serienmotor mit Feldschwächung und Anpassung des Wendefeldes

- und Anpassung des Wendefeldes

A Motoranker
 D Feldschwächdrosselspannung
 E Erregerwicklung
 W Wendepolwicklung
 K Kompensationswicklung
 R_{W1} primärer Wendepolshunt, Ohmisch
 R_{W2} sekundärer Wendepolshunt, Ohmisch
 S Schalter
 T Anpasstransformator und Induktivität

5. Einsatz rotierender, kollektorloser Fahrmotoren im Schienenschnellverkehr der Zukunft

Die Tendenz, im Schienenschnellverkehr fahrplanmässige Geschwindigkeiten von über 200 km/h mit dem System Rad-Schiene zu verwirklichen, verlangt den Einsatz noch leistungsfähigerer Triebfahrzeuge. Die seit 1960 erzielten enormen Fortschritte in der Halbleiter-Technik, insbesondere bei den Thyristoren, ermöglichen bereits heute den Einsatz von kollektorlosen Drehstrom-Fahrmotoren in Triebfahrzeugen. Gegenüber dem Kommutatormotor bringt der kollektorlose Drehstrommotor eine Reihe von Vorteilen:

- Geringerer Unterhaltsaufwand durch einfachere Rotorkonstruktionen, speziell durch den Wegfall des Kommutierungsapparates.
 - Größere Leistung bei gleichem Volumen oder gleicher Masse, bzw. kleinerer Masse und Volumen bei gleicher Leistung durch die Eliminierung des die Drehzahl und Leistung begrenzenden Kommutators.
 - Stufenloser Übergang vom Fahrbetriebsbereich in den Bremsbetriebsbereich.
 - Kleinerer Anschaffungspreis für den einfachen kollektorlosen Drehstrommotor.

Die erste erfolgreiche Realisierung eines stufenlos regelbaren Einzelachs-Drehstromantriebes mit Asynchron-Käfigankermotoren auf 50-Hz-Einphasen-Hochleistungslokomotiven

wurde 1955 von der Maschinenfabrik Oerlikon verwirklicht [10]. Dem damaligen Stand der Technik entsprechend erfolgte die Phasen- und Frequenzumformung über einen Gleichstrom-Zwischenkreis (Ward-Leonard-System) mittels rotierenden Umformern. Das hohe Gewicht und die Kosten für die rotierende Umformeranlage verhinderten jedoch den wirtschaftlichen Erfolg dieser Konzeption.

Eine frühere Entwicklung der Lokomotivfabriken Ganz-Mavag [14] mit Einzelachs'antrieb durch Asynchron-Käfigankermotoren, basierend auf Kandos Phasen- und Frequenzumformer-Prinzip, konnte sich wegen technischer Schwierigkeiten nicht durchsetzen.

Mit der erfolgreichen Inbetriebsetzung der Dieselelektrischen Lokomotive DE 2500, einem Gemeinschaftswerk von BBC und Rheinstahl-Henschel [11] im Jahre 1971 und einer Versuchslokomotive [12; 15] im Jahre 1973 bei den Schweizerischen Bundesbahnen für 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz-Fahrdrähtspeisung wurde ein erster wesentlicher Schritt in die neue moderne Technik der statischen Frequenzumformung mittels steuerbaren Halbleiterventilen getan. Beide Fahrzeuge werden von robusten, in zahllosen Industrieantrieben seit Jahrzehnten bewährten Asynchron-Käfigankermotoren angetrieben. Diese sind jedoch den speziellen Anforderungen des Bahnbetriebes und des gewählten Umrichterverfahrens anzupassen.

Ein stufenlos gesteuerter Spannungs- und Frequenzumrichter ermöglicht es, den Käfigankermotor trotz seines Nebenschlussverhaltens in jedem beliebigen Punkt innerhalb der Begrenzungslinie des $Z-v$ -Diagramms zu betreiben. Damit aber können alle traktionstechnischen Anforderungen an den Antriebsmotor in optimaler Weise erfüllt werden.

Neueste Entwicklungen in der Stromrichtertechnik³⁾ gestatten es, den Aufwand für die Umformung der zeitlich pulsierenden Einphasen-Wechselstromenergie in Gleichstromenergie niedrig zu halten. Eine erfolgversprechende Schaltungsvariante mit zwei phasenversetzt getakteten Vierquadranten-Stellen ergibt bei Vollast theoretische Netzleistungsfaktoren von 99,9 % und weitgehende Oberwellenfreiheit des primären Netzstromes. Damit aber konnten einige der bestehenden Probleme bei Stromrichter-Fahrdrähtlokomotiven gelöst werden, so dass der Bau und die Erprobung einer Hochleistungs-Fahrdräht-Lokomotive für $16\frac{2}{3}$ Hz Einphasenspeisung, angetrieben von kollektorlosen Asynchron-Käfigankermotoren, noch in diesem Jahrzehnt zu erwarten ist.

Literatur

- [1] K. Meyer: Die Prototyplokomotiven der Serie Re 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweiz. Bauzeitung 90(1972)48, S. 1227...1253.
- [2] K. Meyer: Die Lokomotiven Serie Re 4/4 II und Re 4/4 III der SBB. Schweiz. Bauzeitung 88(1970)14, S. 311...333.
- [3] Zugförderung. Brown Boveri Mitt. 40(1953)1/2/3, S. 86...88.
- [4] E. Kocher, E. Ister und A. Fehr: Die Gleichrichter-Lokomotiven Ae 4/4 II Nr. 261 und 262 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS). Brown Boveri Mitt. 52(1965)9/10, S. 661...679.
- [5] A. Jaeger: Die thyristorgesteuerte Lokomotive Nr. 161 der Serie Re 4/4 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS). Brown Boveri Mitt. 56(1969)11/12, S. 632...636.
- [6] R. Moser, H. Haas und E. Dünner: Die Fahrmotoren der SBB-Lokomotive Re 4/4 II. Bulletin Oerlikon -(1966)368/369, S. 26...35.
- [7] E. Dünner, K. Nylund und R. Moser: Probleme, Stand und zukünftige Entwicklung der Isolation von Traktionsmotoren. Bulletin Oerlikon -(1966)368/369, S. 11...25.

³⁾ Ein diesbezüglicher Bericht wird in der Zeitschrift «Elektrische Bahnen» erscheinen.

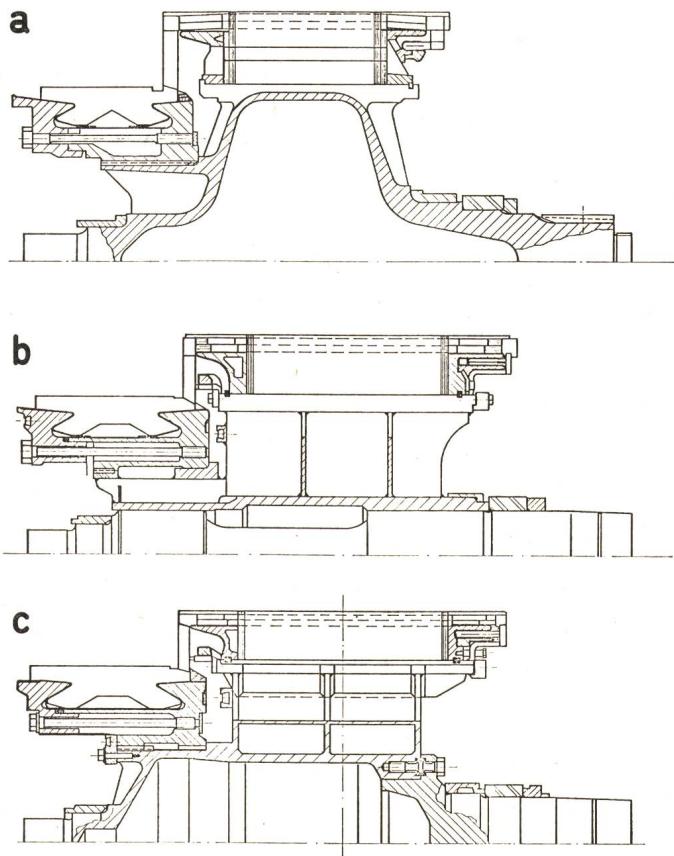


Fig. 11 Längsschnitt von Ankerkörpern

- a Längsschnitt des gegossenen Ankerkörpers für den Motor der Ae 6/6
- b Längsschnitt eines geschweißten Ankerkörpers mit auspressbarer Welle
- c Längsschnitt eines Ankerkörpers in Verbundkonstruktion mit einem abschraubbaren Wellenende

- [8] K. Nylund und F. Galliker: Entwicklung neuer Isolationssysteme der Klasse H für den Traktionsmaschinenbau. Brown Boveri Mitt. 59(1972) 10/11, S. 514...525.
- [9] G. Manz und G. Gierth: Eigenschaften von Wechselstrom-Grenzleistungslokomotiven bei konventioneller Technik und bei Anwendung der Leistungselektronik. Internationaler Congress Elektrische Bahnen 1971. Technik heute und morgen. München 11. bis 15. Oktober 1971. Vortragssammelband. Berlin, VDE-Verlag, 1971, S. 2.1.01...2.1.20.
- [10] C. Bodmer u. a.: Die 50 Hz-Oerlikon-Güterzuglokomotiven CoCo, Nr. 14001...14002 der Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF). Bulletin Oerlikon -(1957)320, S. 1...24.
- [11] W. Teich: Dieselelektrische Triebfahrzeuge mit schleifringlosen Asynchron-Fahrmotoren. Internationaler Congress Elektrische Bahnen 1971. Technik heute und morgen. München 11. bis 15. Oktober 1971. Vortragssammelband. Berlin, VDE-Verlag, 1971, S. 3.2.01...3.2.20.
- [12] M. Brechbühler und H. Stettler: Probleme bei der Entwicklung und Auslegung eines Oberleitungs-Versuchs-Fahrzeugs mit Asynchron-Fahrmotoren. Internationaler Congress Elektrische Bahnen 1971. Technik heute und morgen. München 11. bis 15. Oktober 1971. Vortragssammelband. Berlin, VDE-Verlag, 1971, S. 4.5.1...4.5.27.
- [13] H. H. Weber: Untersuchung und Erkenntnisse über das Adhäsionsverhalten elektrischer Lokomotiven. Schweiz. Bauzeitung 83(1965)48, S. 877...888.
- [14] A. Falk, J. Pal und G. Villanyi: Elektrische Lokomotiven. Ganz-Mavag Bulletin -(1973)44, S. 56...63.
- [15] M. Brechbühler und W. U. Bohli: Erfahrungen mit der Versuchslokomotive Be 4/4 12001 der Schweizerischen Bundesbahnen mit statischen Umrichtern. Brown Boveri Mitt. 60(1973)12, S. 581...588.

Adresse der Autoren:

R. Moser und B. Pinter, AG Brown, Boveri & Cie, Werk Oerlikon, 8050 Zürich.