

Technikgeschichte
Modelle und Rekonstruktionen



Johannes Abele/Gerhard Mener

Der Tesla-Motor



Deutsches Museum

Technikgeschichte
Modelle und Rekonstruktionen

Johannes Abele/Gerhard Mener

Der Tesla-Motor



Deutsches Museum

Die Beitragsreihe „Technikgeschichte und Berufsbildung, Modelle und Rekonstruktionen“ wird im Rahmen eines Projektes von der Hauptabteilung Programme am Deutschen Museum betreut und von den jeweiligen Fachabteilungen des Deutschen Museums unterstützt.

Diese Veröffentlichung wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung und Wissenschaft gefördert.

In der Reihe „Technikgeschichte“ sind bereits erschienen:

Das Stereoskop

Die Rennspindel

Der Jacquardwebstuhl

Der Edisonzähler

Der Page-Motor

Der Tretradkran

Die Lichtbogenlampe

Die Meßschraube

Die Entstehung der Funktechnik

Die Feilenhaumaschine

Was nützen historische Modelle und Rekonstruktionen?

Redaktion:	Gisela Aeckerlein MPZ, Roland Lampp
Modellbau:	Johann Szakasch, Thomas Eisenblätter
Layout:	Roland Lampp
Technische Zeichnungen:	Karlheinz Büttner
Text und Layout:	Deutsches Museum, München
Herstellung:	prograph gmbH, München

Copyright © 1995 by Deutsches Museum München, 2. Auflage 1997
ISBN-Nummer: 3-924183-34-1

Inhalt

Vorwort	5
Konzeption der Ausbildungsmaterialien	5
Aufbau der Ausbildungsmaterialien	6
1. Einleitung	8
2. Spielereien im Labor	10
3. Gleichstromnetze und Elektromotoren	12
3.1. Entwicklung und Verbreitung von Gleichstromnetzen	12
3.2. Konkurrenten des Gleichstromnetzes	17
3.2.1. Kampf mit dem Wechselstrom	17
3.2.2. Konkurrenz der Antriebsformen	19
4. Teslas Mehrphasenmotor	20
4.1. Mehrphasen-Wechselstrom vor und während Tesla	20
4.2. Nicola Tesla und die Westinghouse Company	21
4.3. Michael von Dolivo-Dobrowolsky und die AEG	24
5. Elektrifizierung	27
5.1. Drehstromübertragung	27
5.2. Elektromotoren im Gebrauch	32
6. Nachbau und Versuche	34
6.1. Der Teslamotor	34
6.2. Aufbau des Motors	35
Literaturhinweise	37
Abbildungsnachweis	38
Konstruktionszeichnungen	39

Vorwort

Im Gegensatz zur Allgemeingeschichte hat die Geschichte der Technik nach wie vor keinen Platz im anerkannten Kanon der schulischen Bildung. Technikgeschichtliche Themenbereiche sind in den Lehrplänen der allgemeinbildenden Schulen nicht vorgesehen. Obwohl die Technik seit Beginn der Industrialisierung vor rund zweihundert Jahren wie keine andere Kraft in immer schnellerem Rhythmus weltweit die gesellschaftlichen Entwicklungen - und die Natur - beeinflusst, gehört es immer noch nicht zum Selbstverständnis der Industriegesellschaft, sich mit den historischen Entwicklungsbedingungen dieser Kraft kritisch auseinanderzusetzen. Wie notwendig eine derartige Auseinandersetzung ist, verdeutlicht auch die aktuelle Umwelt - und Technikdiskussion, in der allzu oft Technikglauben und Technikkritik nur emotional aufeinanderprallen.

In der Debatte um eine sozial verträgliche und umweltschonende Technik kann gerade auch die kritische Vergegenwärtigung der historischen Entwicklung von Technik Vorurteile abbauen helfen und zur Versachlichung beitragen.

An diesem Ziel ist auch das vom Deutschen Museum durchgeführte und vom Bundesminister für Bildung und Wissenschaft geförderte Projekt „Technikgeschichte - Modelle und Rekonstruktionen“ orientiert. Mit diesem Projekt wurde erstmals der Versuch unternommen, technikgeschichtliche Zusammenhänge durch den Nachbau historischer Erfindungen begreifbar zu machen und für die Berufsbildung in ausbildungsgerechter Form anzubieten. Die hierzu erarbeiteten Materialien sind vor allem für den Einsatz in der betrieblichen Ausbildung konzipiert und enthalten alle Informationen, die für eine lebendige praktische und theoretische Beschäftigung mit technikhistorischen Fragestellungen und Problemlösungen erforderlich sind.

Konzeption der Ausbildungsmaterialien

Das didaktische Konzept für die zu erstellenden technikgeschichtlichen Ausbildungsmaterialien wurde gemeinsam von Mitarbeitern des Deutschen Museums und betrieblichen Ausbildern entwickelt. Es ist methodisch an der in der Praxis der betrieblichen Ausbildung bereits bewährten Unterrichtsform der „Projektarbeit“ orientiert.

Im Zentrum dieser Unterrichtseinheiten steht jeweils der Nachbau einer technischen Erfindung, die technikhistorisch bedeutsam und deren konstruktive wie fertigungstechnische Anforderungen auch für betriebliche

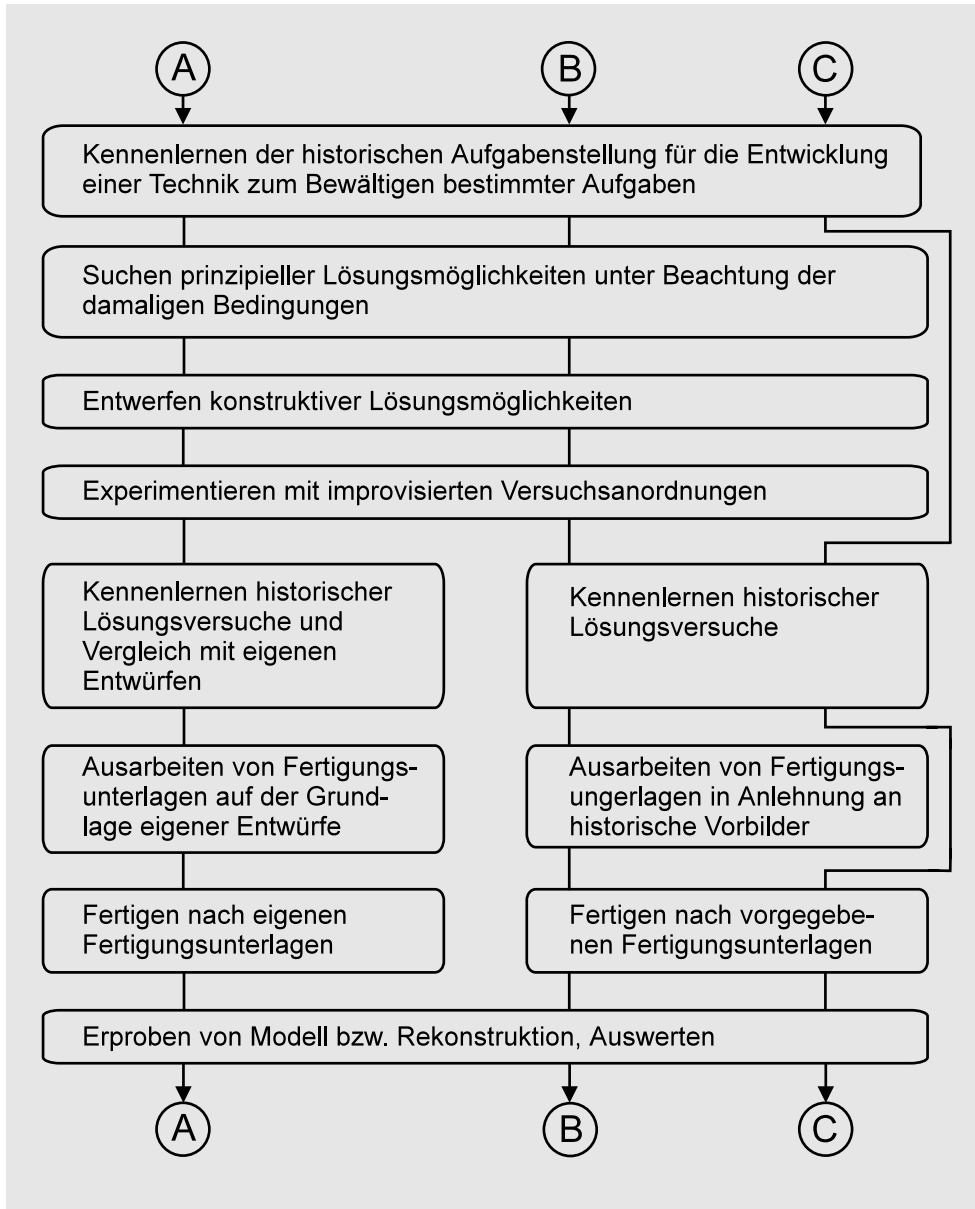
Ausbildungsziele von Interesse sind. Dem Nachbau voran geht die Klärung der besonderen sozialen, ökonomischen und technischen Bedingungen der jeweiligen historischen Situation, innerhalb derer diese technische Erfindung erfolgte und sich als Problemlösung mehr oder weniger rasch durchsetzen konnte. Aufgrund der hierbei gewonnenen Informationen ermöglicht der praktische Nachbau dieser Erfindung in „nacherfindenden“ Arbeitsschritten und darauf aufbauenden Versuchen ein umfassenderes Verständnis für die gefundene historische Problemlösung und der ihr zugrundeliegenden technischen und naturwissenschaftlichen Prinzipien. Abgeschlossen wird die Projektarbeit durch einen Blick auf die Folgen dieser Erfindung für die Weiterentwicklung dieser Technik und ihrer gesellschaftlichen Bedeutung bis hin zu aktuellen Problemen, deren Lösung heute als dringend empfunden wird.

Aufbau der Ausbildungsmaterialien

Die Ausbildungsmittel, die in erster Linie für die Hand des Ausbilders gedacht sind, haben den Charakter einer Materialsammlung. Sie sind so aufgebaut, daß die für die angestrebten Ziele der Projektarbeit benötigten Informationen auch getrennt benutzt werden können:

- Darstellung der jeweils thematisierten technischen Entwicklung und ihrer historischen Bedingungen (Ursprung, wichtige Entwicklungsschritte, Gegenwart);
- historische Abbildungen mit kurzen Erläuterungen zur Veranschaulichung der geschichtlichen Entwicklung;
- Darstellung der spezifischen historischen Situation, die zur Erfindung oder Entwicklung des zum Nachbau vorgesehenen Objekts führte. Dargestellt werden die vom Erfinder vorgefundenen Voraussetzungen und Probleme, deren Lösung und Bedeutung für die weitere Entwicklung;
- kurzer biographischer Abriß der Erfinderpersönlichkeit;
- für den Nachbau erforderliche Informationen und Konstruktionszeichnungen, dazu einige didaktische Hinweise zur Organisation der Projektarbeit und Anregungen zur Durchführung von Versuchen während oder nach Fertigstellung der Rekonstruktion.

Die Informationen können dabei in unterschiedliche pädagogische Schrittfolgen eingebaut werden, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen:



Die Arbeitsschrittfolge A - A stellt höchste Anforderungen an die Auszubildenden; das Ergebnis ist eine weitgehend selbständig erarbeitete technische Lösung. Eine derart intensive Auseinandersetzung mit einem technischen Problem kann - vom erworbenen spezifischen Wissen abgesehen - auch die Einstellung zur Technik verändern und Einsichten in den Ablauf von technischen Entwicklungen überhaupt gewinnen helfen und damit eine wirksame Motivationshilfe für die Ausbildung sein. Dieser Weg kann selbst „schulmüden“ Auszubildenden kleine Erfolgserlebnisse auf theoretischem Gebiet bringen, weil solche Kenntnisse auf praktischem, experimentellem Weg und durch unmittelbare Erfahrung erlangt werden.

Bei der Schrittfolge B - B folgt der schöpferischen Auseinandersetzung mit dem technischen Problem die Fertigung nach Abgleich mit den vorgegebenen Fertigungsunterlagen. Damit ist das Gelingen des Nachbaus sichergestellt.

Die Schrittfolge C - C ist mit dem geringsten Aufwand verbunden. Aber auch hier wird der Zusammenhang von moderner Technik und ihren in der Vergangenheit liegenden Wurzeln sichtbar gemacht.

1. Einleitung

Drehstrommotoren gehören heute zu unseren wichtigsten Antriebsquellen und halten unser Leben in Bewegung. Angetrieben von einem Drehstrommotor jagt der ICE über die Schienen. In den Industrieunternehmen sorgen sie dafür, daß die großen Maschinen laufen. Die Drehstrommotoren können die mechanische Arbeit aber alleine nicht erzeugen. Sie brauchen dazu die Verbindung mit dem grenzübergreifenden Stromnetz, das elektrische Energie an jedem Verbrauchspunkt bereitstellt. Transformatoren sorgen in einer Vielzahl von Umspannstationen für die *Umwandlung* der Stromspannung. Hochspannungsnetze, Mittelspannungsnetze und lokale Leitungsnetze ermöglichen die *Übertragung* der elektrischen Energie. Im ganzen Land verteilte Schaltzentralen sind für die *Kontrolle* des Stromflusses zuständig. Kleine photovoltaische Solaranlagen sowie Turbinen und Generatoren in riesigen Kraftwerken dienen zur *Erzeugung* der elektrischen Energie aus anderen Energieträgern. Erst im Verbund eines solchen *Elektrizitätssystems* sind die Drehstrommotoren funktionsfähig.

Schaut man in die siebziger Jahre des neunzehnten Jahrhunderts zurück, sieht man ganz andere Formen, wie mechanische Arbeit produziert wurde. Handwerker und Industrieunternehmen verwendeten Dampfmaschinen und Gasmotoren an dem Ort, wo die Arbeit benötigt wurde. Häufig griff man auch noch auf Muskelkraft zurück. Auf den großen Industrieausstellungen jener Zeit wurden erste Gleich- und Wechselstromübertragungen über längere Entfernungen und die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit vorgeführt.

Das Arbeitsheft stellt die Geschichte des Drehstrommotors in den Zusammenhang der Entstehung der Elektrizitätsnetze bis zum Beginn des ersten Weltkrieges. Bis dahin hatten sich die Elektromotoren in vielen Bereichen durchgesetzt. Die Darstellung legt den Schwerpunkt auf die Entwicklung des Asynchronmotors. Die Entwicklung von Drehstrommotoren hing maßgeblich von der Verbreitung verschiedener Stromnetze und konkurrierender Antriebsformen wie Gleichstrom- oder Einphasenwechselstrommotoren ab und kann daher nur unter Berücksichtigung des Ausbaus dieser Netze angemessen beschrieben werden.

In einer kurzen Einführung werden Versuche des frühen neunzehnten Jahrhunderts dargestellt, mittels elektrischer Energie mechanische Arbeit zu erzeugen. Dabei wurden die *physikalisch-technischen Grundprinzipien* erschlossen, die der Konstruktion der Elektromotoren in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zugrunde lagen. In diesem Zeitraum begann dann die Entwicklung von Elektromotoren. Aus den Spielereien im Labormaßstab wurden praktisch nutzbare Antriebe. Die Entwicklung der Gleichstrommotoren, ihre beginnende Verbreitung in spezifischen Anwendungsgebieten und die Errichtung der Stromnetze zu ihrer Versorgung werden behandelt. Danach werden Konkurrenten des Gleichstrom-

motors bei der Erzeugung mechanischer Arbeit wie Wechselstrommotoren, Gasmaschinen und Dampfmaschinen vorgestellt. Dieser Kontext zeigt, unter welchen Rahmenbedingungen Teslas Mehrphasenmotor und die von ihm angeregten Weiterentwicklungen konstruiert und in den Markt eingeführt wurden. Teslas Entwicklung und die Arbeit seiner Zeitgenossen am *Asynchronmotor* bilden einen neuen Abschnitt. Schließlich wird beschrieben, wie die elektrotechnische Industrie für diesen Motor gegenüber den konkurrierenden Antrieben wie Gleichstrom- und Gasmotoren *Anwendungsbereiche* erschloß. Im Anschluß an den historischen Teil findet sich am Ende des Heftes eine Beschreibung von Teslas Funktionsmodell eines Drehfeldmotors mit einer Nachbauanleitung.

Die Technikgeschichte verfolgt in diesem Arbeitsheft folgende Ziele:

Durch den Nachbau des Teslamotors lassen sich grundlegende Funktionsprinzipien elektrischer Antriebe vermitteln. Die praktische Beschäftigung mit dem Motor bietet dabei besonders gute Möglichkeiten zur Aneignung dieser Kenntnisse.

In der technikhistorischen Darstellung werden einige der grundlegenden Aufgaben bei der Konstruktion elektrischer Antriebe angesprochen. Bei der Entwicklung der Drehstrommotoren waren *technische Probleme* zu lösen. Daneben war eine möglichst *effiziente Anpassung des Motors* an das bestehende Stromnetz für Wechselstrom nötig. Denn die Energieerzeugung befand sich nicht immer am selben Ort wie der Konsument der mechanischen Arbeit. Außerdem mußte das Wechselstromnetz mit dem Gleichstromnetz und anderen Energieerzeugungsformen wie Dampfmaschinen und Gasmotoren konkurrieren. Die Durchsetzung des Drehstrommotors gegenüber seinen technischen Konkurrenten wurde aber erst durch die zusätzliche *öffentlichkeitswirksame Präsentation* und aktive Maßnahmen der *Markterschließung* möglich. Schließlich ist auch die *Vielfalt der Persönlichkeiten und Unternehmen* mit spezifischen Interessen bemerkenswert, die auf die Entwicklung und Verbreitung des Drehstrommotors einwirkten.

Neben der Darstellung grundlegender Probleme bei der Konstruktion elektrischer Antriebe lassen sich am Beispiel der Entwicklung des Drehstrommotors auch die Funktionsweise des heutigen Elektrizitätsnetzes, seine technischen und kulturellen Zusammenhänge sowie die Stellung der Antriebe in diesem Netz aufzeigen.

2. Spielereien im Labor

Elektromagnetische Effekte beschäftigten seit dem Anfang des 19. Jahrhunderts zahlreiche Wissenschaftler und Erfinder. 1820 wurde im Labor des dänischen Physikers Oersted eine Magnetnadel über einem stromdurchflossenen Leiter abgelenkt. Dies führte in den folgenden Jahren zu einer hektischen Beschäftigung der damaligen Erfinder und Wissenschaftler mit der Umwandlung von Strom in mechanische Arbeit. 1831 gelang es Faraday, eine elektromagnetische Induktion nachzuweisen.

Mitte der dreißiger Jahre starteten die Versuche, mittels des Elektromagnetismus eine *Drehbewegung* zu erzeugen und den so entwickelten Elektromotor aus dem Labor heraus zur praktischen Nutzung zu führen. Auch der preußische Beamte Jacobi begann 1834 mit dem Bau eines Elektromotors. Als Rotor waren vier Elektromagnete auf einer beweglichen Holzscheibe gegenüber vier feststehenden Elektromagneten angebracht. Als Stromquelle diente eine Batterie aus Zinkplatten, die er in mit Schwefelsäure gefüllte Kupfertröge eintauchte. Die Stromzuführung und Umpolung der beweglichen Elektromagnete erfolgte über einen auf der Achse ihrer Scheibe angebrachten Kommutator.

Jacobi wie auch die anderen Entwickler zeigten ein beachtliches Geschick, Gelder für ihre Arbeiten zu mobilisieren. Jacobi, inzwischen Professor in Estland, führte sein Modell 1837 dem russischen Zaren vor und entwickelte seinen Motor daraufhin mit dessen Unterstützung am russischen Hof in St. Petersburg weiter. 1838 und 1839 gelang es ihm, mit seinem Motor ein Boot auf der Newa in St. Petersburg anzutreiben.

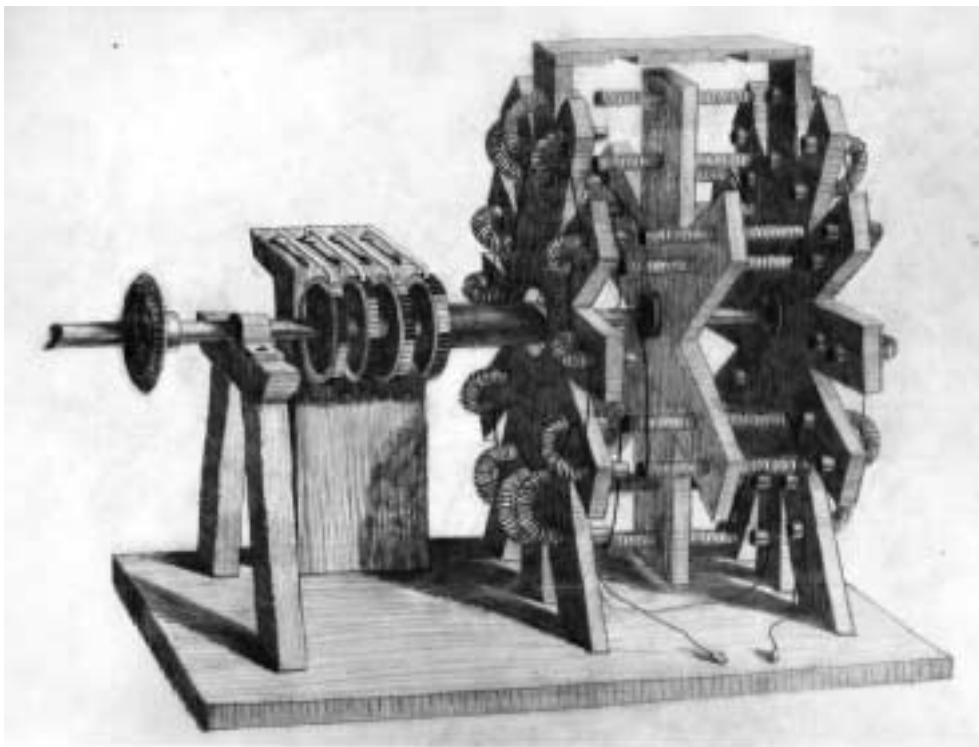
Jacobis Motor konnte sich aber wie die Motoren anderer zeitgenössischer Entwickler wegen der *Kosten der Stromquelle* nicht durchsetzen. Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung des durch die Zinkbatterien gewonnenen Stroms war so gering, daß schon bei Leistungen von 1 PS andere Antriebsformen wie die Dampfmaschinen billiger waren.

Schon bald, nachdem Faraday die elektromagnetische Induktion nachgewiesen hatte, begannen Erfinder und Unternehmer sich in ihren Werkstätten damit zu beschäftigen, eine elektromagnetische Stromquelle zu entwickeln, die die Batterien ersetzen konnte. Bei magnetelektrischen Maschinen wurde durch die Drehung von Spulen auf Eisenkernen gegenüber Permanentmagneten in ersteren ein Strom induziert. Er konnte über Kommutatoren wahlweise als Wechselstrom oder als Gleichstrom abgenommen werden.

Einige bemühten sich darum, diese Stromquelle kommerziell zu nutzen. Seit 1833 wurden die Generatoren zur Stromerzeugung für Telegrafen eingesetzt. Spätere Modelle wurden in den Galvanisierfabriken der damaligen Zeit als Stromquelle zur Versilberung und Vergoldung verwen-

det. 1857 demonstrierte der Brite Holmes erfolgreich die Möglichkeit, mit Generatoren Bogenlampen für Leuchttürme zu betreiben und so die bis dahin verwendeten Öllichter abzulösen.

Die Betriebskosten dieser Generatoren waren zu jener Zeit aber immer noch sehr hoch. Die schweren Permanentmagnete mußten regelmäßig ausgewechselt werden, da sie ihren Magnetismus mit der Zeit verloren. Außerdem waren die Möglichkeiten begrenzt, höhere Stromstärken und Spannungen zu erzielen. Schließlich erforderten die großen Generatoren auch besonders geschultes Personal. Aus diesen Gründen setzten sich die magnetelektrischen Generatoren nicht durch. Sie kamen selbst in den schon eroberten Anwendungsnischen in Schwierigkeiten. So wurden in die Leuchttürme zum Teil wieder Öllampen eingebaut, da die Probleme der Generatoren zu groß erschienen.



*Abb.1:
Elektromotor des in Göttingen geborenen Moritz Hermann Jacobi (1801-1874) aus dem Jahr 1838. Mit einem Elektromotor dieser Bauart konnte er 1838 und 1839 jeweils für mehrere Stunden ein Boot auf der Newa in St. Petersburg antreiben und so die Funktionsfähigkeit seines Motors demonstrieren.*

3. Gleichstromnetze und Elektromotoren

3.1. Entwicklung und Verbreitung von Gleichstromnetzen

Zwar war in den 1860er Jahren die Möglichkeit bekannt, mittels Elektromotoren mechanische Kraft zu erzeugen. Es fehlte aber vor allem an effizienten Mitteln, den zu ihrem Betrieb notwendigen Strom zu produzieren. Eine Lösung zeichnete sich bei der Beschäftigung mit dem *elektrodynamischen Prinzip* ab, das in Europa seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts bekannt war. Dabei wurde der im Anker des Generators erzeugte Strom durch die Elektromagneten des Ständers geleitet. So konnten sich der im Anker und im Ständer erzeugte Strom gegenseitig verstärken. Auf diese Weise wurde die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung wesentlich gesteigert. Am Ende des Jahres 1866 wurde an mehreren Stellen in Deutschland und England fieberhaft an diesem Verfahren gearbeitet. Der deutsche Unternehmer Werner Siemens, dessen Unternehmen in Berlin zuvor hauptsächlich Telegrafenanlagen produziert und vertrieben hatte, bemühte sich am erfolgreichsten darum, seine Entwicklung in der Öffentlichkeit zu präsentieren und zur praktischen Nutzung weiterzuentwickeln.



Abb.2:
Zénobe Theophil Grammé (1826-1901).



Abb.3:
Werner Siemens (1816-1892).

Siemens hatte bei seinen elektrodynamischen Maschinen anfänglich mit großen technischen Problemen zu kämpfen. Die Wirbelströme im Anker führten beim Probetrieb immer wieder zu einer starken Erwärmung des Motors. Außerdem produzierte der von Siemens konstruierte, mit einer axialen Wicklung umgebene Doppel-T-Anker nur einen pulsierenden Gleichstrom. Dem französischen Unternehmer und früheren Werkmeister Grammé gelang es 1872/1873 durch die Weiterentwicklung des *Ringankers*, einige dieser technischen Probleme zu überwinden. Unter Rückgriff auf die Arbeiten des Italieners Pacinotti nahm er als Läufer einen Eisenring, den er mit einer mehrfach unterteilten Wicklung

versah. Dadurch konnte er einen glatten Gleichstrom erzeugen. Das Innere des Ankers bildete der frühere Werkmeister aus Drahtbündeln. Dadurch vermied er die durch Wirbelströme hervorgerufene Erwärmung. Zur Effizienzsteigerung integrierte er zusätzlich das Prinzip der Selbsterregung. Außerdem schaffte er es, im Gegensatz zum Doppel-T-Anker, bei dem die Wicklungsdrähte übereinander in einer beidseitigen Vertiefung des Ankers gelagert waren, wesentlich mehr Wicklungsdrähte dem Luftspalt zwischen Anker und Ständer und somit der elektromagnetischen Induktion auszusetzen.

Die Verkaufszahlen für Grammés Ringanker-Maschinen schossen auch in die Höhe, während die von Siemens Doppel-T-Anker-Maschinen zurückfielen. Aus der technischen Sackgasse konnte dem Berliner Unternehmer erst sein 1867 in das Unternehmen eingetretener Chefkonstrukteur Friedrich von Hefner-Alteneck mit der Entwicklung des Trommelankers helfen. Wegen der starken Konkurrenz durch Grammés Produkte beschäftigte er sich seit 1872 mit Generatoren und Elektromotoren. Er versuchte, die Vorteile des französischen Ankers zu nutzen, gleichzeitig aber den durch Patente geschützten Motor des Franzosen weiterzuentwickeln, um die Zahlung von Lizenzgebühren zu vermeiden. Dazu um-



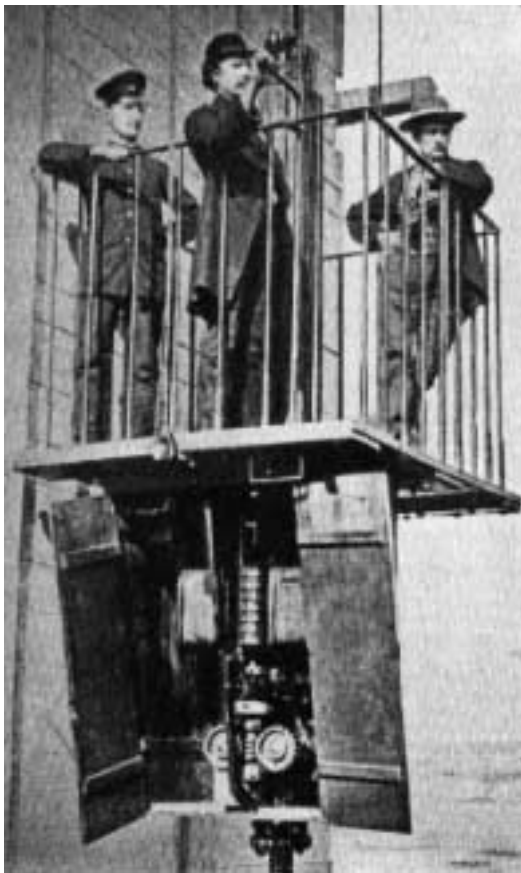
*Abb.4:
Mit einem Gleichstrommotor betriebene elektrische Bahn, die Siemens 1879 auf der Berliner Gewerbeausstellung präsentierte.*

wickelte er einen zylinderförmigen Anker ganz mit Draht. So vermied er die bei Grammés Anker dadurch auftretenden Leistungsverluste, daß die innerhalb des Läufers liegenden Spulenhälften nicht genutzt werden konnten. Aber erst 1875 konnte er das Problem der Wirbelströme in den Griff bekommen, indem er den Anker aus Eisendrähten baute, die er auf einem Hohlzylinder aufbrachte.

Neben der Überwindung dieser technischen Probleme erforderte der Betrieb von Elektromotoren auch eine Übertragung des Stroms. 1873 und 1876 präsentierten Grammé und Siemens auf den Weltausstellungen

gen in Wien und Philadelphia eine Stromübertragung mit angeschlossenem Elektromotor. 1879 ließ Siemens auf der Berliner Gewerbeausstellung die erste von einem Gleichstrommotor angetriebene Lokomotive fahren. In der Folge richtete er auch einige mit Gleichstrommotoren betriebene Bahnen ein. 1880 stellte Siemens seinen ersten mit einem Gleichstrommotor betriebenen Aufzug in Mannheim aus. Trotz dieser öffentlichkeitswirksamen Präsentationen wurden kaum Elektromotoren verkauft.

1878 begann der amerikanische Erfinder und Unternehmer Thomas Edison an der Entwicklung des ersten Gleichstromnetzes zu arbeiten, das die Nutzung des Stroms erleichterte, da nun nicht mehr jeder Konsument seine eigene Stromerzeugungsquelle brauchte. 1882 eröffnete er sein erstes zentrales Kraftwerk zur Stromproduktion in New York. Schon



*Abb. 5:
Mit einem Gleichstrommotor betriebener elektrischer Fahrstuhl, den Siemens auf der Industrieausstellung in Mannheim 1880 präsentierte.*

im Jahr zuvor hatte er begonnen, sein Stromsystem mit Hilfe des amerikanischen Bankhauses Drexel, Morgan & Co nach Europa zu übertragen. Durch eine gut inszenierte Präsentation seiner Entwicklung auf der Pariser Weltausstellung 1881 weckte er das Interesse, sein Konzept zu übernehmen.

Der 26jährige Praktikant Oskar von Miller war so begeistert von den sich eröffnenden Möglichkeiten, auch entfernter liegende Energiequellen wie die bayerischen Wasserkräfte auszunützen, daß er die Stromübertragung vorantreiben wollte. Er organisierte 1882 eine Elektrizitätsausstellung im

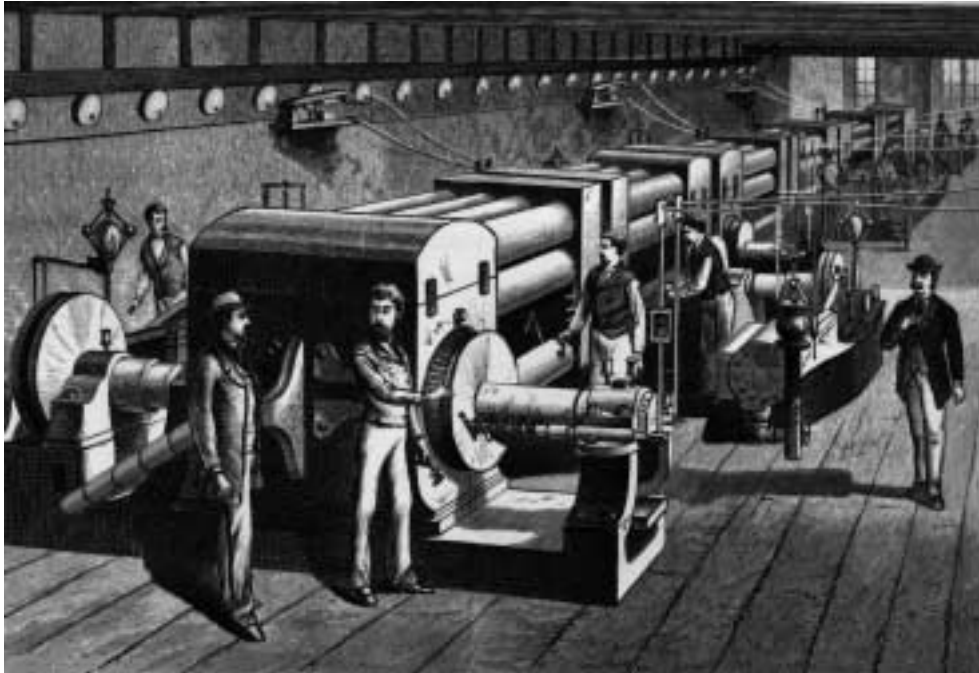


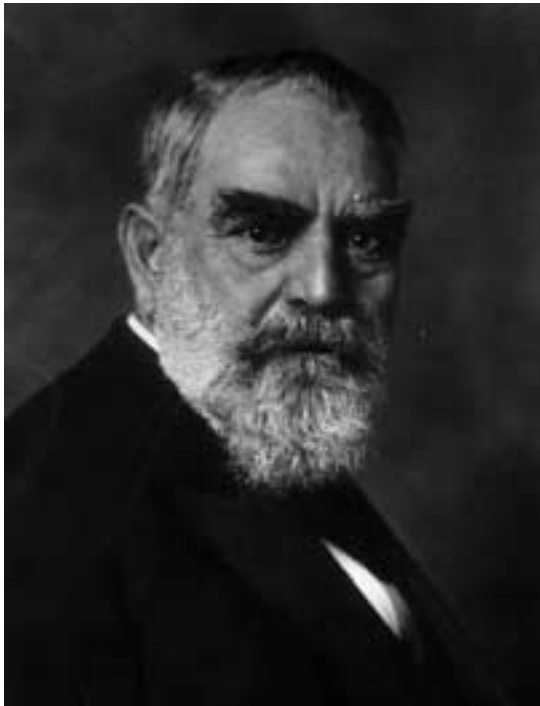
Abb. 6:

Edisons zentrales Kraftwerk zur Stromerzeugung in der Pearl Street in New York. Dieses erste Kraftwerk Amerikas wurde am 4.9.1882 in Betrieb genommen und diente mit Unterbrechung durch einen Großbrand 1890 bis 1894 zur Stromerzeugung für die elektrische Beleuchtung in der Wall Street.

Münchener Glaspalast. Dabei übertrug er erstmals Gleichstrom zur Kraftübertragung mit einer Spannung von 1500-2000 Volt über 57 Kilometer von Miesbach nach München.

Elektrotechnische Unternehmen konstruierten und verkauften ganze *Stromsysteme* mit einzelnen Komponenten für die Stromerzeugung, Stromübertragung und Anwendung. 1882 richtete Edisons englische Tochtergesellschaft in London ein erstes Gleichstromnetz ein. Im selben Jahr gründete der deutsche Ingenieur Emil Rathenau mit Hilfe deutscher Großbanken eine Studiengesellschaft zur Verwertung von Edisons Konzept. 1883 wurde sie in die Deutsche Edison Gesellschaft (DEG) und 1887 in die Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG) umgewandelt. Schon 1883 grenzten Siemens und die AEG in einem 1894 wieder aufgelösten Vertrag ihre Interessen gegenseitig ab. Während die AEG die Netze installieren und betreiben sollte, durfte sie dessen Elemente wie etwa Generatoren nur von Siemens beziehen. 1884 eröffnete die damalige DEG das erste zentrale Elektrizitätswerk in Berlin. Danach wurden immer mehr lokale Stromnetze und Stromkraftwerke errichtet. Deutschlands erstes Gleichstromnetz setzte allerdings der Stuttgarter Installateur Reißer, angeregt durch die Ausstellung von Edisons System in Paris, im Frühjahr 1882 in Betrieb.

Diese Gleichstromnetze erzeugten vor allem Strom für elektrische Beleuchtungsanlagen. Gleichstrommotoren wurden zu jener Zeit nur in Einzelfällen betrieben. Die technischen Probleme bei der Abstimmung der verschiedenen Komponenten des Gleichstromnetzes trugen wesentlich dazu bei, daß in der Praxis kaum Motoren angewandt wurden.



*Abb. 7:
Oskar von Miller (1855-1934).*

Stromsysteme benötigen zur Stromübertragung und Stromanwendung unterschiedliche Spannungen: So erforderten die Kollektoren der Gleichstrommotoren zum Wenden des Stroms geringe Betriebsspannungen. Die üblichen 110 Volt ermöglichten aber wegen Stromverlusten im Leiter nur Übertragungreichweiten von einigen hundert Metern. Zur Umwandlung der Spannung des Gleichstroms mußte man aber auf umständliche Methoden mit einem geringen Wirkungsgrad zurückgreifen, indem man etwa einen Motor und Generator hintereinanderschaltete.

Die Ingenieure versuchten diesen Engpaß bei längeren Übertragungen zu überwinden. 1884 und 1886 gab es die Versuchsringleitung zwischen Creil und Paris mit 5000 bis 6000 Volt und die Übertragung von Kriegstetten nach Solothurn mit 2500 Volt. 1887 installierte Thury in Genua eine Hochspannungsgleichstromübertragung. Bei diesen Versuchen schaltete man mehrere Gleichstromgeneratoren hintereinander, um höhere Spannungen zu erzielen. Hierbei blieb das grundsätzliche Problem der effizienten Transformation der Spannungen beim Gleichstrom jedoch ungelöst. Ebenso konnten die ab 1883 zur Erzeugung höherer Spannungen gebauten mehrpoligen Maschinen den Engpaß nicht überwinden.

Die Kopplung des Gleichstrommotors mit dem Netz führte ebenfalls noch zu Schwierigkeiten. An den Kommutatoren, die den Rotor mit Strom speisten, entstand regelmäßig starker Funkenflug, der den Gebrauch hoher Spannungen erschwerte. Anfangs sahen die Maschinisten darin ein Zeichen für den guten Betrieb des Motors. Als Anfang der achtziger Jahre der Bedarf nach höheren Spannungen zur Stromübertragung deutlich wurde, bemühten sich die Konstrukteure schon bald, diesen technischen Engpaß des Stromnetzes zu überwinden.

3.2. Konkurrenten des Gleichstromnetzes

3.2.1. Kampf mit dem Wechselstrom

Seit Ende der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelte sich der Wechselstrom zu einem Konkurrent des Gleichstroms. Zu jener Zeit begann man, mehrere elektrische Beleuchtungsanlagen an ein Wechselstromnetz zu schalten. 1883 präsentierten der Franzose Gaulard und der Engländer Gibbs der Öffentlichkeit in London erstmals ein verbessertes Wechselstromnetz. Es gelang den beiden ab 1884, ihr Stromübertragungssystem anlässlich mehrerer Industrieausstellungen zu installieren, die Funktionsfähigkeit einer *Übertragung von Wechselstrom* über längere Strecken nachzuweisen und so eine Alternative zum Gleichstromnetz zu demonstrieren. 1885 brachte die ungarische Firma Ganz verbesserte Transformatoren auf den Markt. Dadurch reduzierten sich im Vergleich zu Gleichstromnetzen die hohen Übertragungskosten. Deshalb konnte das Unternehmen Ganz mit diesem System bis 1890 beinahe siebzig Zentralstationen zur Stromerzeugung einrichten.

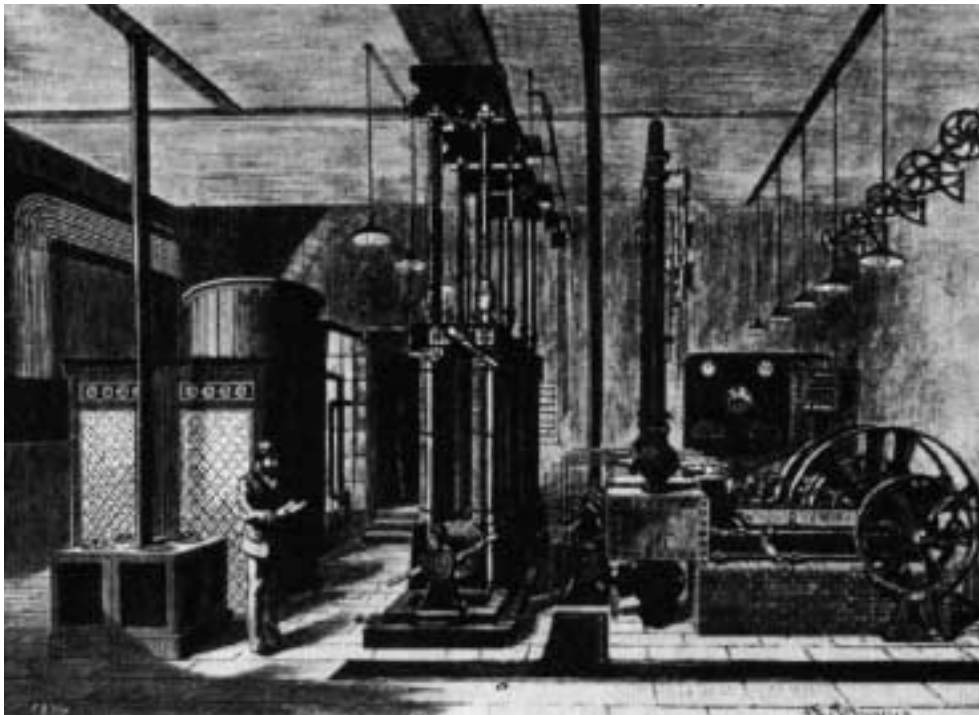


Abb.8:
Erstes zentrales Kraftwerk der Deutschen Edison Gesellschaft in Berlin in der Friedrichstrasse, 1884.

Allerdings hatte auch das Wechselstromnetz einen zentralen Nachteil. Es gab keinen *leistungsfähigen Motor*. Bei den damals gebräuchlichen und auch vertriebenen Motoren erzeugte der Wechselstrom im Ständer ein mit der Netzfrequenz wechselndes Magnetfeld. Bei der Verwendung eines Elektromagneten als Läufer mußte ihm Strom über Kollektoren zugeführt werden, um das entsprechende Anzugsmoment zu erzeugen und ihn in Bewegung zu halten. Wenn man wie die ungarische Firma

mer in Richmond, USA, ein durch Gleichstrommotoren betriebenes Netz von Straßenbahnen einzurichten. Die seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts installierten Gleichstromnetze hatten auch in unserem Jahrhundert noch länger Bestand.

Zwischen den Anhängern des neu aufkommenden Wechselstromnetzes und den Vertretern des alten Gleichstromnetzes entflammte in den 1880er Jahren ein erbitterter Streit, welches System verwendet werden sollte. Vor allem Edison versuchte, sein Gleichstromnetz zu retten, indem er die Gefährlichkeit des Wechselstroms herausstellte. Ein trauriger Höhepunkt waren die Vorführungen Browns, eines seiner ehemaligen Angestellten. 1888 demonstrierte er in öffentlichen Vorträgen die Gefährlichkeit des Wechselstroms, indem er einen Hund durch diese Stromart tötete. Mit Unterstützung Edisons bemühte er sich darum, daß in der damaligen Diskussion über die Änderung der Todesstrafe die Hinrichtung mit Wechselstrom durchgesetzt wurde. So versuchte Edison zu suggerieren, daß hohe Wechselstromspannungen zu gefährlich seien. Damit verband er das Ziel, für die Verwendung von Wechselstrom Spannungsobergrenzen festzuschreiben, die eine Übertragung über weite Entfernungen unattraktiv machten.

3.2.2. Konkurrenz der Antriebsformen

Diese Auseinandersetzungen und die technischen Probleme der beiden Stromsysteme können nur zum Teil erklären, warum noch 1895 in der Praxis kaum Elektromotoren als Kraftquelle verwendet wurden. Denn schon seit der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts wurden kleinere und effizientere Antriebsformen gefordert, um das Überleben der Handwerksbetriebe in der Konkurrenz zu Fabrikbetrieben zu sichern. Und auch die neu entstehenden größeren Unternehmen benötigten Kraftquellen zur Erzeugung mechanischer Arbeit. Deshalb muß man sich die damals in Handwerk und Industrie gebräuchlichen Antriebe betrachten.

Neben Dampfmaschinen eroberten sich in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts Gasmotoren einen rasch wachsenden Marktanteil. 1890 lassen sich schon mehr als 7000 im ganzen Deutschen Reich nachweisen. Daneben wurden auch mit anderen Energieträgern wie Benzin oder Petroleum betriebene Verbrennungsmotoren verwendet. Auch die Wasserkraft wurde dazu benutzt, mechanische Arbeit zu gewinnen. Ein weiterer Konkurrent, mit Heißluft betriebene Maschinen, konnte sich dagegen nicht durchsetzen. Somit mußten die Elektromotoren bei ihrer Markteinführung gegen schon installierte oder in den Markt drängende Antriebe kämpfen.

Kommunen und Unternehmen sträubten sich häufig, auf die neuen Elektromotoren umzusteigen. Die kommunalen Honoratioren hatten zum Teil schon Gasnetze als Energiequelle zur Erzeugung von Licht und mechanischer Arbeit installiert, so daß sie sich nicht durch die Errich-

tung eines Stromnetzes selber Konkurrenz machen wollten. Dies verzögerte in zahlreichen Städten eine Elektrifizierung. Daneben erforderten der Betrieb und die Überwachung der neuen Antriebsformen einen erheblichen Personalaufwand. So warnten die Riemenantriebe der dampfmaschinengetriebenen Motoren Maschinisten bei Überlast durch laute Geräusche, da sie verrutschten, wenn die Maschine außer Takt kam. Die Elektromotoren dagegen liefen zunächst ruhig weiter und machten höchstens durch einen strengen Geruch und zusätzliche Wärme auf die drohenden Schäden aufmerksam. Auch blieb umstritten, welchen Kostenvorteil Elektromotoren im Betrieb gegenüber anderen Antriebsformen brachten. Dies führte dazu, daß man Gleichstrommotoren zunächst nur für Spezialmaschinen in größeren Unternehmen und in Handwerksbetrieben einsetzte, wo der Arbeitsablauf von Natur aus personalintensiv war. Bei der Massenproduktion mit ihrem Drang zur Rationalisierung verzichtete man zunächst auf diese neuen Antriebe.

4. Teslas Mehrphasenmotor

4.1. Mehrphasen-Wechselstrom vor und während Tesla

Zahlreiche Forscher und Erfinder arbeiteten Anfang des 19. Jahrhunderts an technischen Problemen des Wechselstrommotors. Der italienische Physiker Galileo Ferraris war damals als technischer Berater der ungarischen Firma Ganz beschäftigt. Angeregt durch diese Erfahrungen entwickelte er 1885 einen Zweiphasen-Wechselstrommotor: Zwischen



*Abb.10:
Friedrich Haselwander (1859-
1932).*

zwei um neunzig Grad versetzten Spulenpaaren brachte er einen frei drehbaren Kupferkörper an. Diese Spulenpaare wurden jeweils an eine Phase eines phasenverschobenen Wechselstroms angeschlossen. So erzeugte Ferraris ein kreisförmig durch die Spulenpaare *wanderndes Magnetfeld*, das in dem Kupferkörper eine Spannung induzierte. Im Läufer floß daher ein Strom, der wiederum ein Magnetfeld erzeugte. Das Magnetfeld des Läufers folgte dem *Drehfeld* des Ständers. Der Läufer blieb jedoch wegen Reibung und Stromwärmeverlusten hinter der Drehzahl des Ständers zurück. Dieser Schlupf sorgte dafür, daß im Läufer ständig eine Spannung induziert wurde, die den Läufer in Bewegung hielt. Für einen solchen Motor wurde später der Begriff *Induktions- oder Asynchronmotor* verwendet. Bei seinem Motor hatte Ferraris wichtige Probleme der vorhergehenden Wechselstrommotoren gelöst: Er benötigte keine zusätzliche Erregung für den Rotor und keine Kommutatoren mehr. Ferraris bemühte sich allerdings nicht weiter um eine praktische Nutzung, da er annahm, er könne mit seinem Motor nur einen maximalen Wirkungsgrad von 50% erzielen.

Ähnlich erging es kurze Zeit später einem badischen Kleinunternehmer in Offenburg. Friedrich Haselwander kam 1887 unabhängig von Tesla und Ferraris auf die Idee, mit einem dreiphasigen Wechselstrom drei um 120° versetzte Wicklungen auf einem kreisförmigen Ständer zu speisen. Damit wollte er wie Ferraris ein kreisförmig rotierendes Magnetfeld in Ständer und Anker erzeugen. Schon im Juli und August 1887 waren erste Modelle fertig. Am 12. Oktober startete er die praktische Nutzung seiner Maschine als Drehstromdynamo in einer Offenburger Hutfabrik. Schon kurz danach begann Haselwanders Kampf mit den Behörden, der schließlich dazu führte, daß er seine Maschine nur zur Gleichstromerzeugung verwandte.

Die Erzeugung von Wechselstrom wurde von der Postbehörde nicht genehmigt, da man eine Störung der Telegrafienlinie fürchtete. Aus dem gleichen Grund untersagte die Behörde selbst den versuchsweisen Betrieb der Maschine als Drehstrommotor. Auch bei den Bemühungen, seine Erfindung patentieren zu lassen, scheiterte Haselwander. Zunächst wurde sein Patentantrag aus formalen Gründen zurückgewiesen. Vermutlich hatte der Sachbearbeiter die neue Idee des badischen Tüftlers gar nicht verstanden. Bei einer erneuten Einreichung wurde eine Patenterteilung abgelehnt, da mittlerweile Tesla seine Version des Mehrphasenmotors hatte patentieren lassen.

4.2. Nicola Tesla und die Westinghouse Company

Kaum ein Name wird mit der Erfindung des Mehrphasenmotors so sehr in Verbindung gebracht wie der von Nicola Tesla. 1878, während seiner Studienzeit in Graz, stieß er auf das Problem, einen Motor ohne Kommutatoren zu konstruieren. Jahre später fand er wie in einem Geistesblitz die Lösung, wenn wir seinen eigenen Worten glauben. Diese Epi-



Abb.11:
Nicola Tesla (1856-1943).

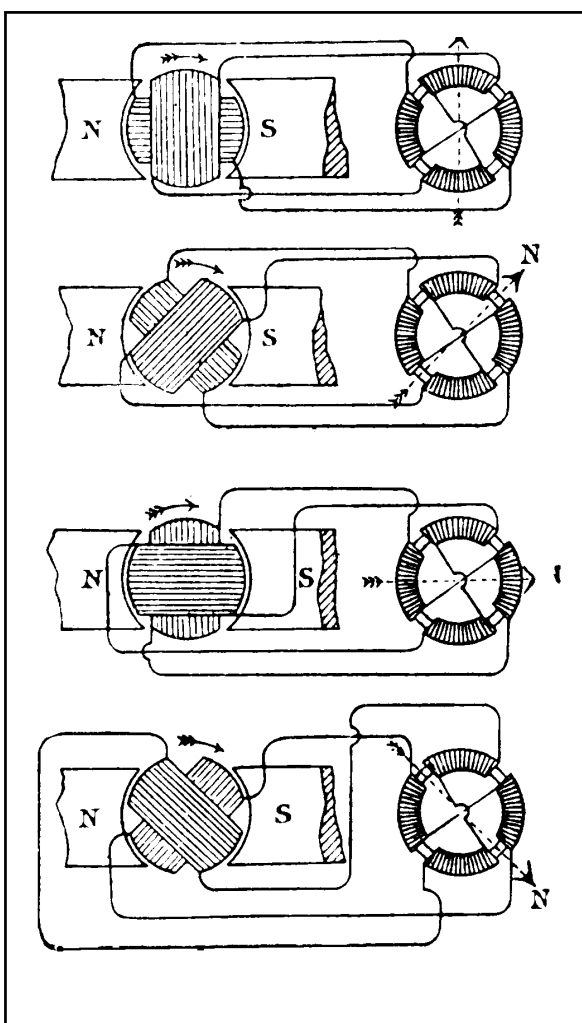


Abb.12:
Zweiphasensystem von Nicola Tesla. Auf dem Ständer des Induktionsmotors (links) sind zwei Spulenpaare angebracht, durch die zwei um 90° verschobene Wechselströme fließen. Im Inneren entsteht ein rotierendes magnetisches Feld.

sode griffen Historiker immer wieder dichterisch überhöht auf - sie fehlt in keinem Werk über die Geschichte des Drehstrommotors:

So ist es glaubhaft, daß er... 1882 gelegentlich eines Spazierganges mit seinem Schulkameraden Szigeti in förmlicher Ekstase den besonders schönen Sonnenuntergang mit Goethes unsterblichen Versen „Sie rückt und weicht, der Tag ist überlebt...“ begleitet und dabei in einen trance-ähnlichen Zustand verfiel, in dem er die Lösung des Problems plötzlich deutlich vor sich sah. Beim Erwachen erklärte er seinem Kameraden die Vision und zeichnete die Lösung in den Sand. (Hillebrand 1959, 415)

Wie später bei den Motoren von Ferraris oder Haselwander sollte die Überlagerung mehrerer phasenverschobener Wechselströme ein Drehfeld erzeugen, dessen induktive Wirkung einen Anker antrieb. Ein Geistesblitz genügte jedoch nicht für die Konstruktion eines neuen Motors: Tesla mußte für den Mehrphasenmotor ein völlig neues elektrisches System entwickeln. Während seiner Tätigkeit für verschiedene elektrotechnische Firmen in Europa und in den USA beschäftigte er sich mit den Problemen, die damit verbunden waren. 1884 wanderte er nach Amerika aus. Zunächst arbeitete er bei den *Edison Machine Works* in New York. Bald darauf gründete er wie viele andere Erfinder dieser Epoche eine eigene Firma und ein Entwicklungslabor. 1887 schließlich reichte er seine ersten Patente für ein *Mehrphasen-Wechselstromsystem* ein, das aus einem *Generator*, einem *Übertragungssystem* und einem *Mehrphasenmotor* bestand.

Bei der Konstruktion eines wirtschaftlich leistungsfähigen Stromsystems spielte die *elektrotechnische Industrie* der Zeit eine wichtige Rolle. Erst elektrotechnische Firmen entwickelten funktionsfähige Mehrphasensysteme und führten sie auf dem Markt ein. In den USA geschah dies maßgeblich durch die Westinghouse Company, neben den Firmen von Edison eines der führenden amerikanischen elektrotechnischen Unternehmen. Westinghouse kaufte 1888 Teslas Patente auf. Als Teil der Abmachung arbeitete Tesla ein Jahr als Entwicklungsingenieur für das Unternehmen in Pittsburgh. Nach verschiedenen Fehlschlägen, die auf die zu hohe Frequenz von 125 und 133 Hz des bestehenden Einphasennetzes zurückzuführen waren, stellte Westinghouse 1890 die Arbeiten am Mehrphasenmotor ein. Ein Jahr später nahmen Ingenieure der Firma die Entwicklungsarbeiten wieder auf - diesmal mit guten Ergebnissen. Auf der Weltausstellung in Chicago im Jahr 1893 führte Westinghouse schließlich einen ersten großen zweiphasigen Induktionsmotor von 300 PS Leistung vor, dessen Strom ein Generator mit der Frequenz von 30 Hz erzeugte - die Netzfrequenz war nun an die Anforderungen des Motors angepaßt worden.

Westinghouse führte die Bestrebungen an, aus den vielfältigen Gleich- und Wechselstromnetzen für Bogenlampen, Glühlampen und Motoren ein *einheitliches Stromnetz* zu schaffen. Auf der Weltausstellung in Chicago verdeutlichte Westinghouse seine Vorstellungen: Ein Zweiphasen-Induktionsmotor diente als die treibende Kraft des ganzen Systems.



*Abb.13:
George
Westinghouse
(1846-1914).*

Er trieb einen Zweiphasen-Wechselstromgenerator an. Das Mehrphasen-Wechselstromnetz erlaubte durch die Verwendung von Transformatoren hochgespannte Stromtransmissionen. Die Kupplung von Zweiphasenmotoren und Generatoren gestattete vor Ort die Umwandlung des Zweiphasenstroms in die Stromart von bestehenden Stromnetzen, an welche die verschiedenen Verbraucher angeschlossen waren.

Eine Standardisierung der Wechselstromfrequenz trieb die Vereinheitlichungsbestrebungen ebenfalls vorwärts: Um 1900 einigten sich die Unternehmen der elektrotechnischen Industrie in den USA auf eine Frequenz von 25 Hz für Stromübertragungen und große Motoren, die Frequenz für normale Verbrauchernetze legten sie bei 60 Hz fest. In Deutschland setzte sich im öffentlichen Stromnetz die Frequenz von 50 Hz durch.

4.3. Michael von Dolivo-Dobrowolsky und die AEG

Michael von Dolivo-Dobrowolsky, Chefkonstrukteur bei der AEG in Berlin, nahm gegen Ende der 80er Jahre des 19. Jahrhunderts die Idee eines sich drehenden Magnetfeldes auf. Er ging im Gegensatz zu Ferraris davon aus, daß auf dieser Grundlage ein leistungsfähiger Motor entwickelt werden konnte. Ferraris und Tesla erzeugten ihr Magnetfeld durch zwei sich überlagernde Wechselströme, wodurch ein stark pulsierendes Drehfeld entstand, das die Drehbewegung des Ankers bremste. Dolivo-Dobrowolsky verminderte die Schwankungen dadurch, daß er die Zahl der Ströme, deren Überlagerung das Drehfeld erzeugte, erhöhte. Dies hätte jedoch eine Steigerung der Zahl der Leitungsdrähte erfordert. In Anbetracht der Tatsache, daß bereits der einphasige Wechselstrom auf scharfen Widerstand stieß, erschien eine Steigerung der Komplexität des

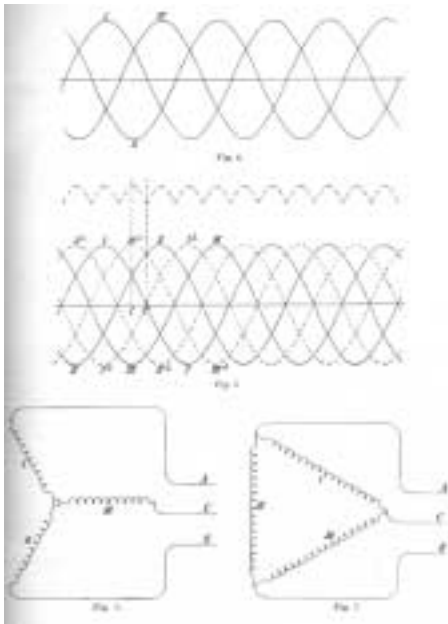
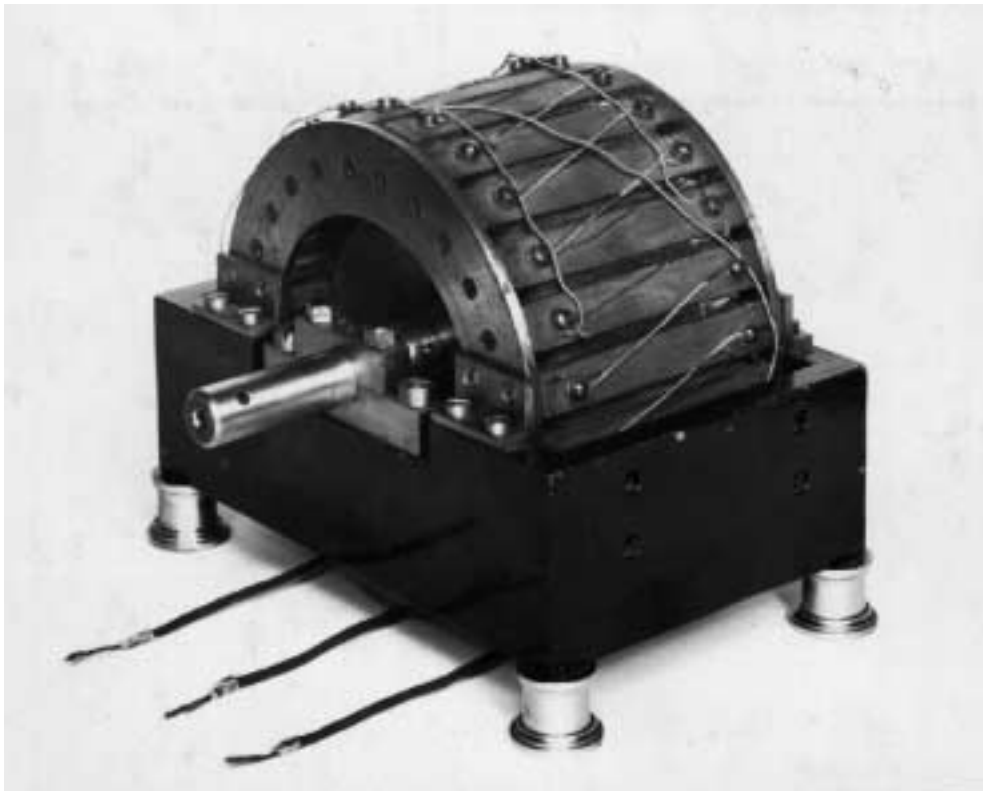


Abb.15:
 Sternschaltung und Dreieckschaltung von Drehstrom. Die Summe der Augenblickswerte der Ströme in den drei Leitern beträgt stets Null. Die Zusammenschaltung der Stränge in einer Stern- oder Dreieckschaltung spart drei gesonderte Rückleitungen. Die Übertragung von elektrischer Energie wird dadurch wirtschaftlicher.



Abb.14:
 Michael von Dolivo-Dobrowolsky (1862-1919), seit 1887 Mitarbeiter, seit 1909 technischer Direktor und Vorstandsmitglied bei der AEG.

Abb.16 (unten):
 Versuchsmotor mit Kurzschlußläufer für Drehstrom von Dolivo-Dobrowolsky aus dem Jahr 1889.



Systems durch mehrere Leitungen nicht angebracht. Dolivo-Dobrowolsky schrieb 1917 im Rückblick:

So kam mir nochmals die Frage der vielen Phasen, also der vielen Leitungen, diesmal in voller Schrecklichkeit vor Augen. Wenn schon der einfache Wechselstrom so wütend angefeindet wird, wie wird es erst werden, wenn er jetzt durch mehrere Leitungen noch verkompliziert wird? (Dolivo-Dobrowolsky 1917, 354).

Außerdem stellte sich das Problem, daß Unternehmen wie die AEG, die bereits Gleichstrommaschinen produzierten, wohl nur zögernd neue Typenreihen in die Produktion einführen würden. Der Übergang von Stromnetzen mit Gleichstrom zum Wechselstrom sollte dadurch erleichtert werden, daß sich der Motor leicht aus vorhandenen Gleichstrommaschinen ableiten ließ.

Dolivo-Dobrowolsky griff zur Lösung dieser technischen und ökonomischen Fragen am Anker von Gleichstrommaschinen an drei Stellen einen Strom ab. Dolivo-Dobrowolsky erhielt so einen dreiphasigen Strom mit nur 3 Leitungen, die Phasendifferenz betrug jeweils 120° . Besondere Rückleitungen wurden dadurch überflüssig, daß die drei Leitungsstränge in einer *Dreiecksschaltung* zusammengeführt wurden. Die Summe der Ströme blieb stets Null, je zwei Leitungen bildeten die Rückleitung der dritten. Wenig später entwarf Dolivo-Dobrowolsky eine weitere Schaltung, die *Sternschaltung*.

Ein erster Versuchsmotor, 1888 angefertigt, lief mit der Leistung von etwa 1/10 PS erfolgreich. Der Läufer war als *Kurzschlußläufer* ausgeführt: In den Nuten eines Ankers aus massivem Eisen steckten Kupferdrähte, die auf beiden Seiten durch eine Stirnplatte oder einen Ring aus Kupfer verbunden waren. Ein größerer Motor mit etwa 3-5 PS erfüllte dann beim Anlauf nicht mehr die Erwartungen der Konstrukteure. Zudem entwickelte er starke Geräusche, bis er die Nenndrehzahl erreicht hatte. Bei 50% Überlast verhielt er sich wieder wie beim Anlauf. Bei größeren Motoren mußte daher beim Anlaufen die Kurzschließung des Ankers variabel sein. Dazu verwendete Dolivo-Dobrowolsky einen Schleifringanker, um beim Anlaufen veränderliche Widerstände vorzuschalten und so den Widerstand im Läuferstromkreis zu vergrößern. Bei steigender Drehzahl wurde der Anlaßwiderstand stufenweise abgeschaltet.

5. Elektrifizierung

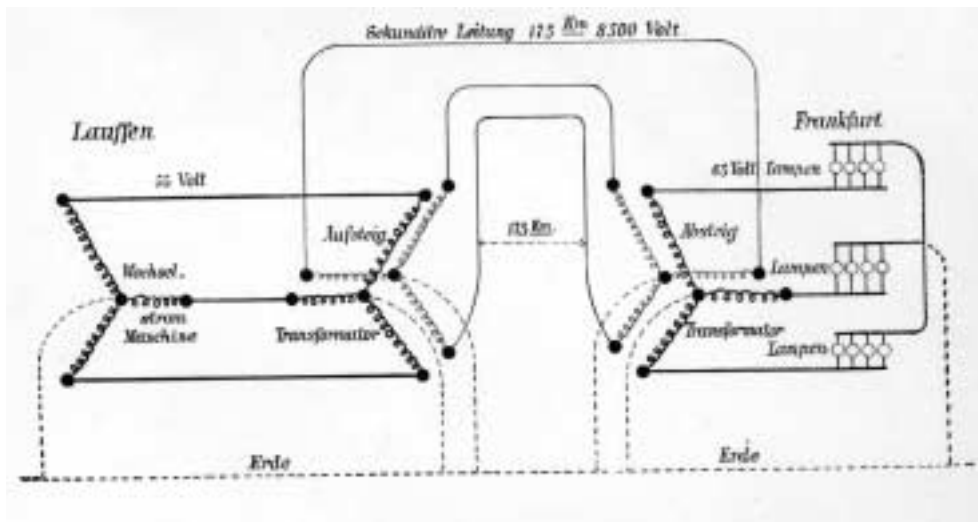
Der Wechselstrommotor mußte sich gegen zahlreiche Konkurrenten durchsetzen. Am nächsten lag die Auseinandersetzung zwischen Gleichstrom- und Wechselstromsystemen. Elektrische Antriebe standen wiederum im Wettbewerb mit Dampfmaschinen, Heißluft-, Gas- und Druckluftmotoren. Die Frage, welche *technischen* Antriebe sich durchsetzten, hing davon ab, wie sich *ökonomische* Interessen der elektrotechnischen Industrie, *politische* Interessen von Kommunen und Mittelstand sowie die Anforderungen der speziellen Anwendungsgebiete in Deckung bringen ließen.



Abb.17:
Drehstromübertragung von Lauffen nach Frankfurt, 1891. Auf der internationalen elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt speiste Drehstrom, der in Lauffen erzeugt wurde, einen 100 PS Induktionsmotor für den Wasserfall im Hintergrund des Bildes und die 1000 Glühlampen des Werbeschildes.

5.1. Drehstromübertragung

Die Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt im Jahr 1891 wurde zu einem Kristallisationspunkt der Auseinandersetzung um das Drehstromsystem. In den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts entstand in der Stadt ein heftiger Streit, ob das neue kommunale Elektrizitätswerk Gleichstrom oder Wechselstrom erzeugen sollte. Im Urteil der Zeitgenossen stand Gleichstrom für im Umkreis *beschränkte* Nutzung von Elektrizität in dicht bewohnten Stadtgebieten. Da Strom in dieser Zeit häufig als Luxusartikel zur Lichterzeugung betrachtet wurde, erschien vielen eine zentrale Stromversorgung der Innenstädte ausreichend. Demgegenüber stand Wechselstrom für die *Verteilbarkeit* der Energie. Wechselstrom schuf die Möglichkeit der Stromübertragung über weite Strecken. Kraftwerke konnten somit unabhängig vom Ort des Energieverbrauchs errichtet werden. Aus den Innenstädten ließ sich dadurch die Belästigung durch Lärm und Schmutz verbannen. An den Stadträndern waren die Grundstückspreise niedriger, zudem war die Verkehrsanbindung für den Transport der





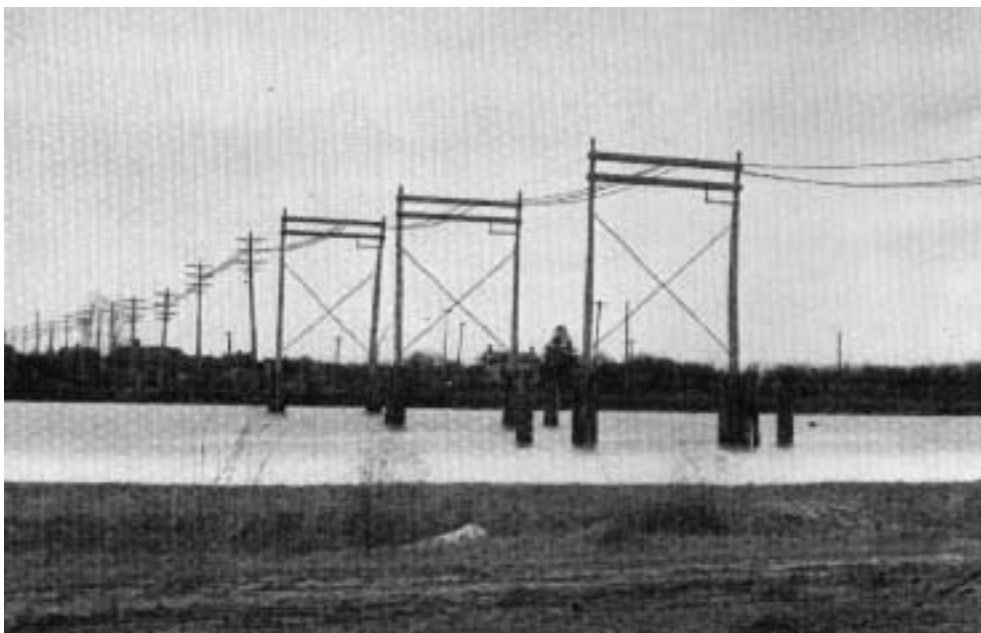
*Abb.18 (links oben):
Schaltungsschema der Drehstromübertragung Lauffen - Frankfurt.*

*Abb.21:
Luftbild der Niagara-Fälle mit Kraftwerksanlagen, 1918.*

*Abb.19 (links, Mitte):
Kraftübertragung Lauffen - Frankfurt, 1891. Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Oerlikon in Lauffen.*

*Abb.20 (links, unten):
Kraftübertragung Lauffen - Frankfurt, 1891. 100 PS Drehstrommotor und Motoren- und Transformatoren-Schaltbrett der Kraftübertragung in Frankfurt, 1891.*

*Abb.22:
22000 V Hochspannungsleitung der Drehstromübertragung von den Niagara-Fällen nach Buffalo.*



Primärenergieträger wie Kohle günstiger. Auch fern gelegene Energiequellen wie Wasserkraft in Mittel- und Hochgebirgen ließen sich erschließen.

Eine Expertenkommission sollte die Frankfurter Streitfrage um Wechsel- oder Gleichstrom lösen. Die Ingenieure konnten jedoch keine klare Empfehlung abgeben. Sie verwiesen darauf, daß es kein absolut besseres System gebe, sondern daß Zweck und Ziel des Systems entscheidend seien. Die Ingenieure machten somit klar, daß der Systemstreit nicht allein mit technischen Mitteln gelöst werden konnte, sondern daß politische, wirtschaftliche und soziale Zielvorgaben in die Ausgestaltung der Elektrifizierung einfließen mußten. Die Stadtväter suchten nun ein Forum, auf dem sie die Streitfrage klären konnten. Leopold Sonnemann, Verleger der Frankfurter Zeitung und Stadtverordneter, regte daher die Durchführung einer elektrotechnische Fachausstellung an, die einen Vergleich der Systeme in großem Maßstab gestatten sollte. Die Konzeption und Planung der Ausstellung lag maßgeblich in den Händen Oskar von Millers.

Die Ausstellungsplanungen stießen auf das Interesse der Schweizer Maschinenfabrik Oerlikon und der AEG. Seit 1890 arbeiteten die Firmen bei der Konstruktion von Drehstromsystemen eng zusammen. Sie sahen die Möglichkeit, auf der Ausstellung in Frankfurt ihr neues Stromsystem vor großem Publikum zu präsentieren. Die beiden Firmen bauten eine Anlage für die Übertragung von hochgespanntem Drehstrom aus dem 175 km entfernten Lauffen am Neckar nach Frankfurt. Zuvor mußten Sicherheitsbedenken der Landesverwaltungen überwunden werden. Wegen des unbekanntes Risikos der Fernübertragung mit Hochspannung wurden mit roter Farbe auf den Übertragungsmasten Totenköpfe angebracht. Die Befürchtung der Postverwaltung, der hochgespannte Strom könnte die Telefonleitungen stören, wurde bei Versuchen in Oerlikon unter Anwesenheit von Vertretern der Regierung und der Post ausgeräumt.

Die Anlage war schließlich am 24. August 1891, kurz vor Ende der Ausstellung, betriebsbereit: Der Strom eines Generators der Maschinenfabrik Oerlikon wurde von AEG- und Oerlikon-Transformatoren hochgespannt. Nach der Stromübertragung und erneuter Spannungstransformation trieb der Strom über einen Dreiphasenmotor der AEG eine Pumpe für einen zehn Meter hohen Wasserfall an und erleuchtete 1000 Glühlampen. Es ist noch zu bemerken, daß auf der Hochspannungsseite keine Schalter eingebaut waren, da sie noch gar nicht entwickelt waren. Von Frankfurt aus konnte die Übertragungsleitung somit nur durch Kurzschluß außer Betrieb gesetzt werden.

Es gab auch Kritiker der Drehstromübertragung. Zu ihnen gehörte selbst der Konstrukteur der Maschinenfabrik Oerlikon, Charles E.L. Brown. Er sah in der Verwendung des Drehstroms statt des bekannten Einphasen-Wechselstroms nur eine Vergrößerung der Schwierigkeiten. Der Übergang von zwei Übertragungsleitungen auf drei erschien ihm immer noch

zu kostspielig. In der Stadt Frankfurt entstand schließlich unter der Beratung Oskar von Millers ein Elektrizitätswerk für einphasigen Wechselstrom, nicht für Drehstrom.

Die erfolgreiche Fernübertragung von 1891 war jedoch Anregung für zahlreiche weitere Kraftübertragungsprojekte. Eines der bekanntesten ist wohl das Kraftwerk an den Niagarafällen. Schon lange gab es Bestre-

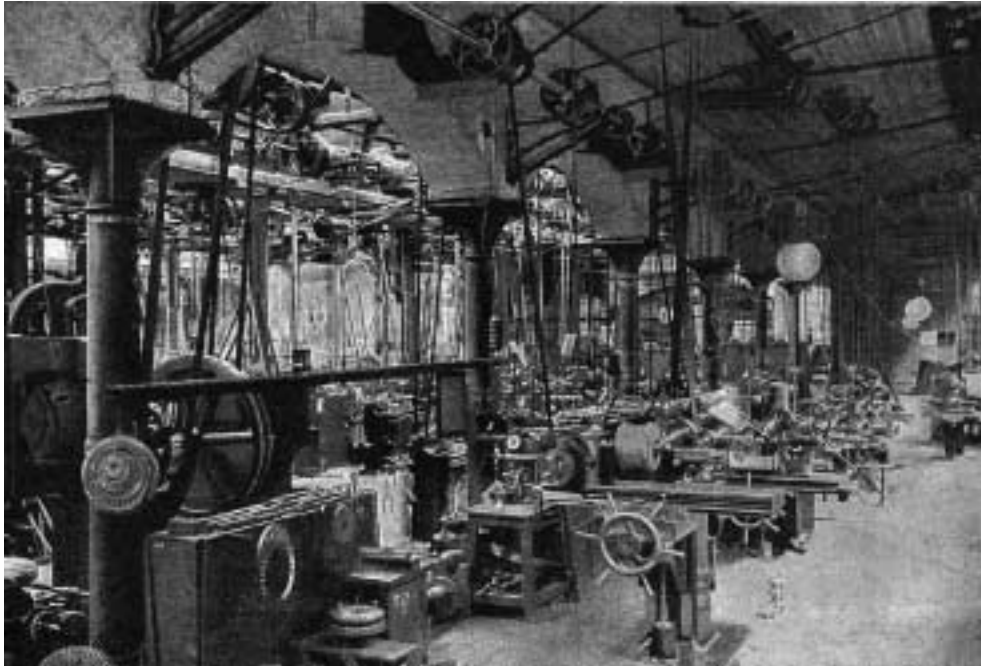
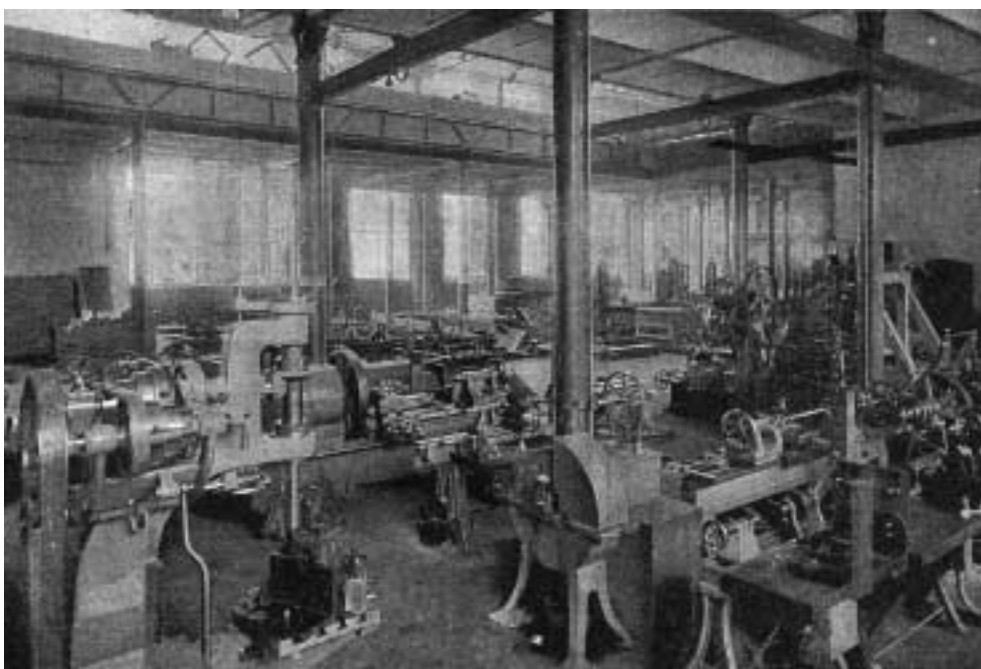


Abb.23a,b:
Gegenüberstellung von Transmissionsantrieb und elektrischem Einzelantrieb in Werkstätten. Beim elektrischen Einzelantrieb (unten) erscheinen die Arbeitsräume heller. Durch den Wegfall der Transmissionsriemen wird eine Gefahrenquelle für Arbeitsunfälle beseitigt.



bungen, die Kraft der Wasserfälle auszunutzen. Die Ausstellung in Frankfurt überzeugte nun die Planer davon, von den Niagarafällen eine hochgespannte Stromübertragung nach Buffalo zu konstruieren. Das Kraftwerk wurde 1895 eingeweiht. Westinghouse hatte zwei Zweiphasengeneratoren gebaut, von General Electric stammten die Transformatoren und eine Dreiphasentransmission nach Buffalo. Eine Anordnung von Westinghouse zur Umwandlung der Phasenzahl verband die verschiedenphasigen Stromsysteme.

5.2. Elektromotoren im Gebrauch

Da elektrischer Strom in den späten 70er und den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts weitgehend zur Beleuchtung eingesetzt und somit vorwiegend nachts Strom benötigt wurde, waren *öffentliche Elektrizitätswerke* im Tagesverlauf ungleichmäßig ausgelastet. Um eine gleichmäßigere Auslastung zu erreichen, bemühten sich Betreiber von Elektrizitätswerken darum, Abnehmer für den Tag zu gewinnen. Mit großem Aufwand warben sie für die Einführung elektrischer Geräte in Haushalt, Industrie, Handwerk und Verkehr. Der größte Teil der Elektromotoren für das *Kleingewerbe* waren Gleichstrommotoren.

Zwar galten kleine Asynchronmotoren als robuste, leistungsstarke, fast wartungsfreie Motoren. Sie hatten in der Einschätzung der Zeitgenossen große Vorzüge bei Anwendungen im Handwerk. Die meisten örtlichen Niederspannungsnetze waren jedoch Gleichstromnetze - entsprechend mußten Handwerker auf den im damaligen Urteil sehr empfindlichen und häufig ungeeigneten Gleichstrommotor zurückgreifen. Drehstrom für Asynchronmotoren war dagegen allenfalls mit Hochspannung im Angebot. Nur große Unternehmen konnten sich hierfür einen Transformator leisten.

Fabriken verfügten häufig über eigene Kraftwerke und waren somit nicht auf öffentliche Elektrizitätswerke angewiesen. Ging es darum, Fabriken mit elektrischen Antrieben auszurüsten, so bot es sich an, zunächst an Stelle einer Fabrikdampfmaschine einen Elektromotor zu setzen und von dort die mechanische Kraft über Transmissionsriemen an die einzelnen Arbeitsmaschinen zu befördern. Der Elektromotor schuf nun neue Möglichkeiten: Beim *Gruppenantrieb* wurden mehrere Maschinen zusammengefaßt und gemeinsam von einem Elektromotor angetrieben. Die Haupttransmission, die stets mit hohen Übertragungsverlusten verbunden war, fiel dadurch weg. Beim *Einzelantrieb* erhielt jede Maschine ihren eigenen Elektromotor. Dadurch konnte generell auf Transmissionen, die stets eine Quelle von Arbeitsunfällen waren, verzichtet werden.

Im Gegensatz zum Gleichstrommotor, für dessen Bedienung ausgebildetes Personal notwendig war, stand der Asynchronmotor im Ruf, eine sehr robuste Maschine zu sein - genau dies war nötig bei Motoren für die Massenproduktion. Drehstrommotoren konnten mit großer Zugkraft von selbst anlaufen, blieben auch bei größerer Belastung nicht stehen,

hatten keine mitschleifenden Zuleitungen und besaßen Anker ohne von außen zugeleiteten Strom. Was stand jedoch einer schnellen Verbreitung des Asynchronmotors entgegen? Im Gegensatz zu Gleichstrommotoren ließ sich die Umdrehungszahl von Asynchronmotoren nicht regeln. Ein kleiner Mehrphasenmotor der Frequenz 50 Hz mit einer Leistung von bis zu 3 PS lief unter Last 1400 oder gar 2800 U/min. Es ist bei diesen Umdrehungszahlen nicht verwunderlich, daß in den frühen 90-er Jahren des 19. Jahrhunderts solche Motoren für Zentrifugen oder Ventilatoren verwendet wurden, während es Schwierigkeiten gab, sie zum Antrieb von Werkzeugmaschinen oder Webstühlen zu verwenden, die für Umdrehungszahlen von 20 bis 300 U/min ausgelegt waren.

Hier stellte sich nun also das Problem, die Umdrehungszahl des Motors für Anwendungen zu reduzieren. Lederriemen, die für Transmissionsübersetzungen verwendet wurden, drohten aufgrund der mit schnellen Umdrehungen verbundenen zahlreichen Biegungen rasch zu ermüden. Die Getriebetechnik des späten 19. Jahrhunderts war ebensowenig auf diese hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten eingestellt. Otto Lasche, Ingenieur bei der AEG, erkannte das Problem und arbeitete als einer der ersten daran, mit mechanischen Übersetzungen die schnellaufenden Drehstrommotoren an die langsameren Werkzeugmaschinen anzupassen. Die elektrotechnische Industrie befaßte sich mit der Entwicklung *mechanischer* Getriebe, um Probleme *elektrischer* Antriebe zu lösen. Als dann andere Industriezweige davon überzeugt werden konnten, daß Elektromotoren die Qualität der Produkte steigerten oder sich in eine Neuorganisation der Produktionsprozesse einfügen ließen, setzte sich die neue Antriebsform durch.

Ab 1890 errichteten zahlreiche Städte ein *Verkehrsnetz* mit elektrischen Straßenbahnen, die mit Gleichstrommotoren ausgerüstet waren. Es gab jedoch Versuche, im Fernverkehr Drehstrommotoren einzusetzen. 1899 gründete die Königlich Preußische Eisenbahnverwaltung in Verbindung mit der AEG und Siemens & Halske eine Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen, um die Möglichkeiten der Elektrifizierung des Fernverkehrs zu untersuchen. Schon zu Beginn des Jahrhunderts dienten Geschwindigkeitsrekorde als Werbeinstrument für Unternehmen und neue Technologien: 1903 stellte ein Drehstromtriebwagen der AEG mit der Geschwindigkeit von 210,2 km/h auf der Militäreisenbahnstrecke Marienfelde-Zossen für ein halbes Jahrhundert einen Rekord auf. Wegen der hohen Belastung des Gleiskörpers und wegen der dreifachen Oberleitung wurden damals Drehstrombahnen in Deutschland nicht gebaut.

6. Nachbau und Versuche

6.1. Der Teslamotor

Der Teslasche Motor, dessen Nachbau hier vorgeschlagen wird, war im Rahmen der Weltausstellung von 1893 in Chicago Teil einer von Westinghouse ausgerichteten Einzelausstellung. Der Originalmotor selbst existiert nicht mehr, die Rekonstruktionen des Motors im Tesla-Museum (Belgrad) und im Deutschen Museum (München) sollen nach erinnerten Daten von Tesla selbst angefertigt worden sein.



*Abb.24:
Teslamotor (Drehfeld-Demonstrationsmotor).*

Der Motor kann prinzipiell entweder als Einphasen- oder als Zweiphasenmotor betrieben werden. Technikhistoriker gehen davon aus, daß Tesla diesen Motor ausschließlich als Funktionsmodell eines Drehfeldmotors konzipiert hatte. Es ist zu beachten, daß die Drehbewegung der Rotorscheibe auf die durch das Drehfeld erzeugte remanente Magnetisierung der Scheibe zurückzuführen ist – nicht auf die induktive Wirkung des Drehfeldes. Die Bezeichnung „Induktionsmotor“ ist somit mißverständlich.

Wie der Nachbau des Teslaschen Drehfeld-Demonstrationsmotor als Projektarbeit im Unterricht organisiert werden kann und welche Lernziele erreicht werden sollten, ist von der besonderen Ausbildungssituation abhängig. Als Anregung dienen folgende Lernziele:

- Darstellung der Geschichte des Elektromotors im Zusammenhang der industriellen und wirtschaftlichen Entwicklung.
- Verdeutlichung der Wirkungsweise und Probleme früher Wechselstrommotoren.
- Diskussion des Zusammenhangs zwischen Elektromotoren und elektrischem Netz in Vergangenheit und Gegenwart.
- Vertiefen von Grundkenntnissen der Elektrotechnik.
- Übung von praktischem, kooperativem Arbeiten.
- Gegebenenfalls können mit dem Motor Versuche durchgeführt werden, wie etwa die Bestimmung des Wirkungsgrads, der Drehzahl und des Drehmomentverlaufs bei An- und Auslauf des Motors.

6.2. Aufbau des Motors

Aufgrund fertigungstechnischer Überlegungen und der zu beachtenden Sicherheitsbestimmungen wurden die Maße des im Museum befindlichen Motors im Maßstab 1:2 verkleinert. Zur Erzeugung einer Hilfsphase für die Schaltung als Einphasenmotor ist ein Kondensator unterhalb der Motorstandplatte angebracht. Die Verwendung einer entsprechenden Hilfsspule ist ebenfalls möglich.

6.2.1. Spulenkörper

Der Spulenkörper besteht aus 32 Lagen Bandeisen von 0,5 mm Dicke und 16 mm Breite. Die einzelnen Lagen werden gegeneinander versetzt und jede Lage mit Isolierlack besprüht. Als Isolierung umwickelt man den Eisenkern mit in Schellack eingelassenem Stoffband.

6.2.2. Spulen

In einem Abstand von jeweils 40 mm sind über dem Spulenkörper vier Spulen gewickelt, je Viertelbogen eine Spule. Von links unten im Uhrzeigersinn gezählt: Spule 1. Die Spulen sind aus einem seidenumsponnenen Cu-Draht von $0,5\text{mm}^2$ Querschnitt gewickelt. Die Wicklung beginnt am unteren Scheitelpunkt mit 220 Windungen nach oben und wieder zurück. Jede der vier Spulen besitzt eigene Anschlüsse, die auf der Bodenplatte des Motors angebracht sind.

6.2.3. Anker

Der Läufer des Motors besteht aus einer 4 mm starken Stahlscheibe mit einem Durchmesser von 260 mm. Die Achse des Läufers wird durch ein Gleitlager in der Motorhalterung geführt und hält den Läufer mittig im Spulenring.

(Der übrige Aufbau kann nach den technischen Unterlagen erfolgen).

Der Wirkungsgrad ist mit kaum 3% ausgesprochen gering. Doch der Motor diente ohnehin nur der Demonstration von Teslas Erfindung, der Erzeugung eines wirksamen Drehfeldes durch mehrphasige, gegeneinander versetzte Wechselströme, das sich ohne Kommutatoren zum Antrieb von Motoren nutzen ließ.

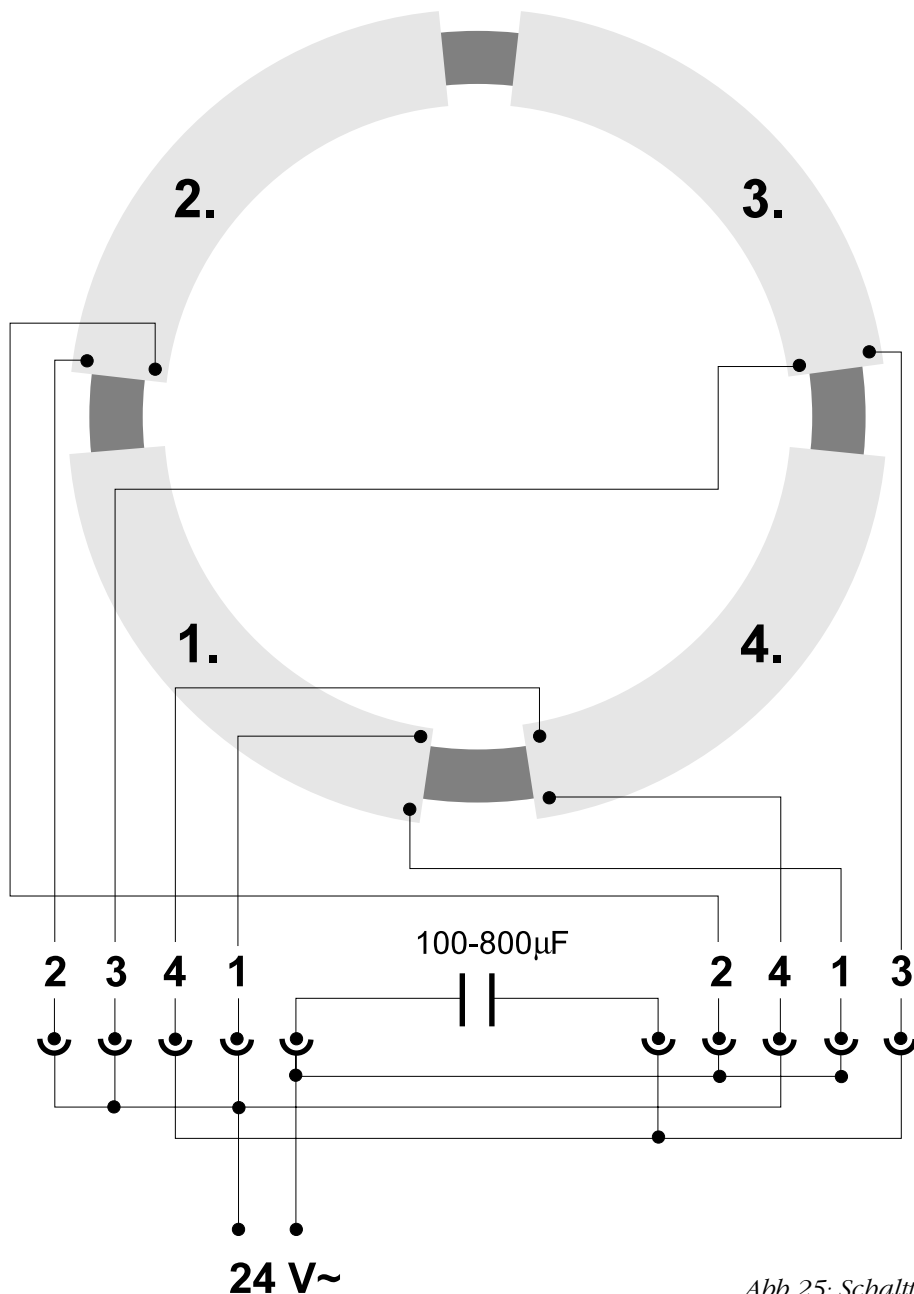


Abb.25: Schaltplan

Literaturhinweise

- Adams, Edward Dean.** (1927). Niagara Power. History of The Niagara Falls Power Company 1886-1918. Bd. 2. New York.
- Boksan, Slavko. (1932).** Nikola Tesla und sein Werk und die Entwicklung der Elektrotechnik der Hochfrequenz- und Hochspannungstechnik und der Radiotechnik. Leipzig / Wien / New York.
- Cheney, Margaret. (1981).** Tesla. Man Out of Time. Englewood Cliffs, N.J.
- Dettmar, Georg. (1940).** Die Entwicklung der Starkstromtechnik in Deutschland bis 1890. Bd.1. Berlin.
- Dolivo-Dobrowolsky, Michael.** (1917). Aus der Geschichte des Drehstroms. In: Elektrotechnische Zeitschrift 38, S. 341ff., 354ff., 366ff., 376ff.
- Heilbronner, Friedrich.** (1991). Fernübertragungsanlagen als Vorläufer der Energieübertragung von Lauffen nach Frankfurt. In: Horst A. Wessel (Hg.). Moderne Energie für eine neue Zeit. Siebtes VDE-Kolloquium am 3. und 4. September 1991 anlässlich der VDE-Jubiläumveranstaltung '100 Jahre Drehstrom' in Frankfurt am Main. Berlin / Offenbach, S. 155-168.
- Hillebrand, Franz.** (1959). Zur Geschichte des Drehstroms. In: Elektrotechnische Zeitschrift A 80, S. 409-421, 453-461.
- Hughes, Thomas P.** (1983). Networks of power. Electrification in Western society 1880-1930. Baltimore / London.
- König, Wolfgang.** (1990). Massenproduktion und Technikkonsum. Entwicklungslinien und Triebkräfte der Technik zwischen 1880 und 1914. In: Wolfgang König / Wolfhard Weber. Netzwerke, Stahl und Strom. [Propyläen Technikgeschichte]. Frankfurt am Main / Berlin.
- Lindner, Helmut.** (1985). Strom. Erzeugung, Verteilung und Anwendung der Elektrizität. [Kulturgeschichte der Naturwissenschaften und der Technik. Bd.16]. Reinbek.
- Miller, Oskar von.** (1931). Die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung auf weite Entfernung. In: Elektrotechnische Zeitschrift 52, S. 1241-1245.
- Ott, Hugo.** (1986). Statistik der öffentlichen Elektrizitätsversorgung Deutschlands 1890-1913. [Historische Energiestatistik von Deutschland Bd. 1]. St. Katharinen.
- Thompson, Silvanus P.** (1896). Mehrphasige Elektrische Ströme und Wechselstrommotoren. Halle.
- Wengenroth, Ulrich.** (1993). How they won the market: Electric mo-

tors in competition with steam engines 1890-1925. In: William Aspray (ed.). Technological Competitiveness. Contemporary and Historical Perspectives on the Electrical, Electronics and Computer Industries. New York, S. 270-286.

Wengenroth, Ulrich. (1989). Motoren für den Kleinbetrieb. Soziale Utopien, technische Entwicklung und Absatzstrategien bei der Motorisierung des Kleingewerbes im Kaiserreich. In: Ders. (Hg.). Prekäre Selbständigkeit. Zur Standortbestimmung von Handwerk, Hausindustrie und Kleingewerbe im Industrialisierungsprozeß. Stuttgart, S. 177-205.

Abbildungsnachweis

Alle nicht aufgeführten Bilder: Deutsches Museum Bildarchiv.

Abb.13,21,22: Adams, Edward Dean (1927). Niagara Power.

Abb.4,5,8: Dettmar, Georg (1940), Entwicklung der Starkstromtechnik.

Abb.15: Elektrotechnische Zeitschrift 12, 1891.

Abb.23: Elektrotechnische Zeitschrift 14, 1893.

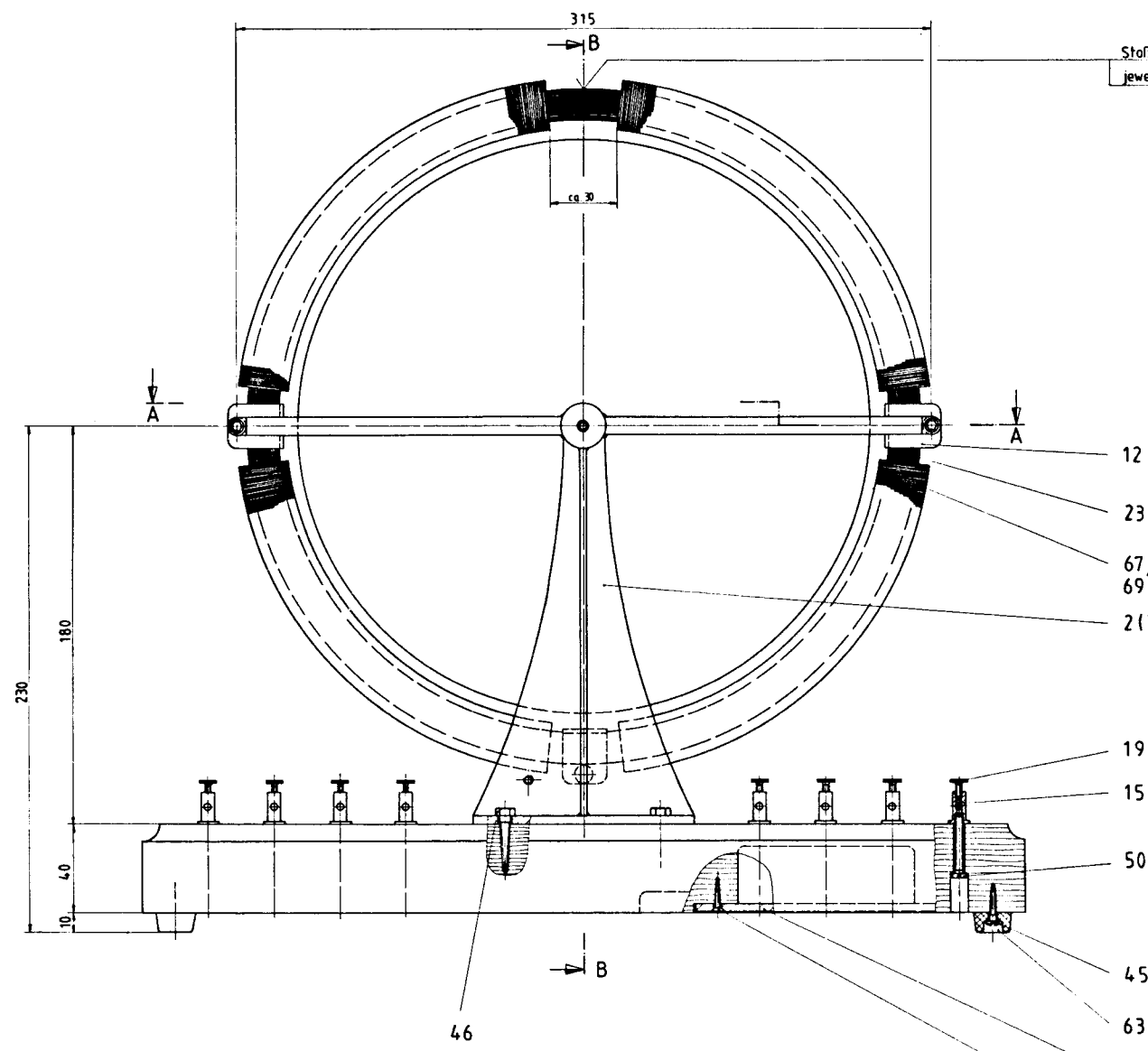
Abb.12: Thompson, Silvanus P. (1896). Mehrphasige elektrische Ströme und Wechselstrommotoren.

Abb.25: J.Szakasch, R.Lampp

Konstruktionszeichnungen

Zur Beachtung:

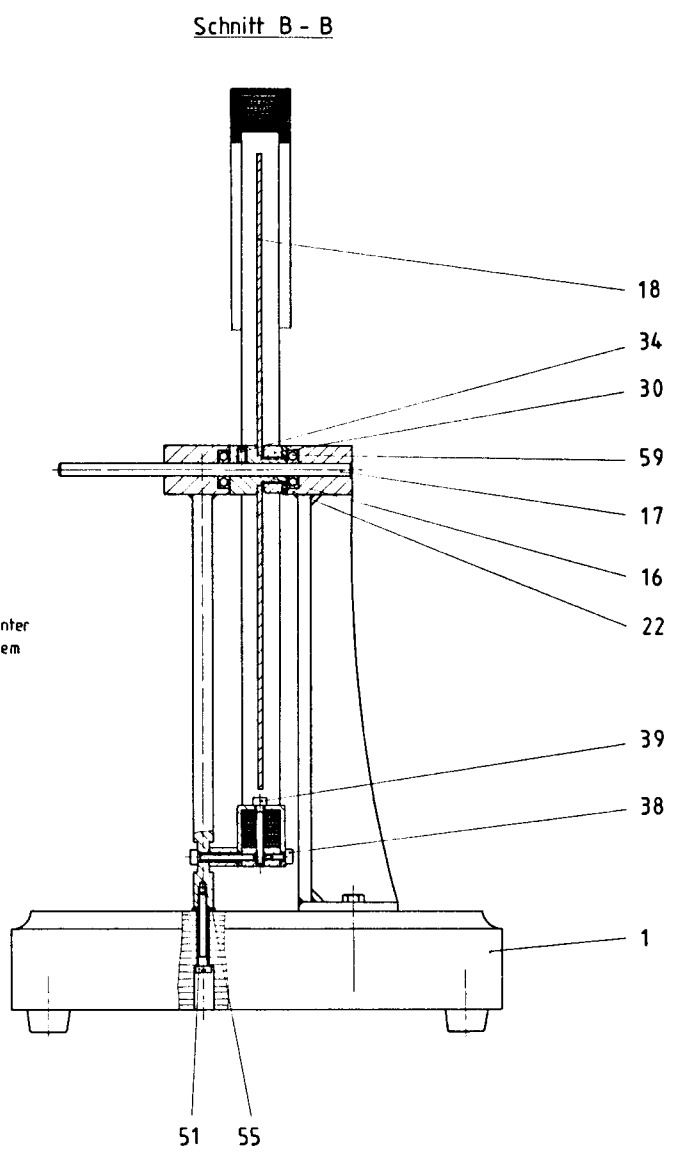
Die Zeichenpläne mußten zum Teil für den Druck verkleinert werden. Der angegebene Maßstab ist für diese Zeichnungen nicht mehr zutreffend.



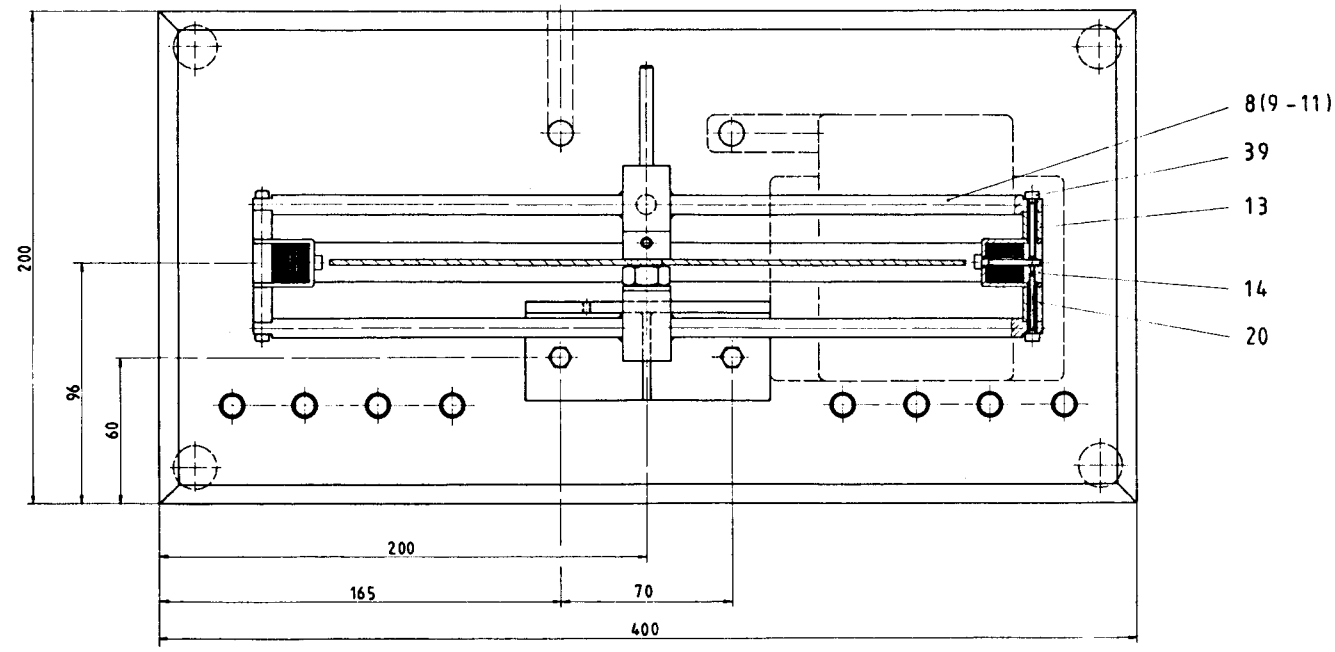
Stoßkante der einzelnen Bänder
jeweils um 15° versetzt!

12
23
67,68 (4 Wicklungen Seidenumspanner
69 Cu - Draht $\varnothing 0,7$ mit farblosem
Lack bestrichen)
2(3-7)

Schnitt A - A



Schnitt B - B



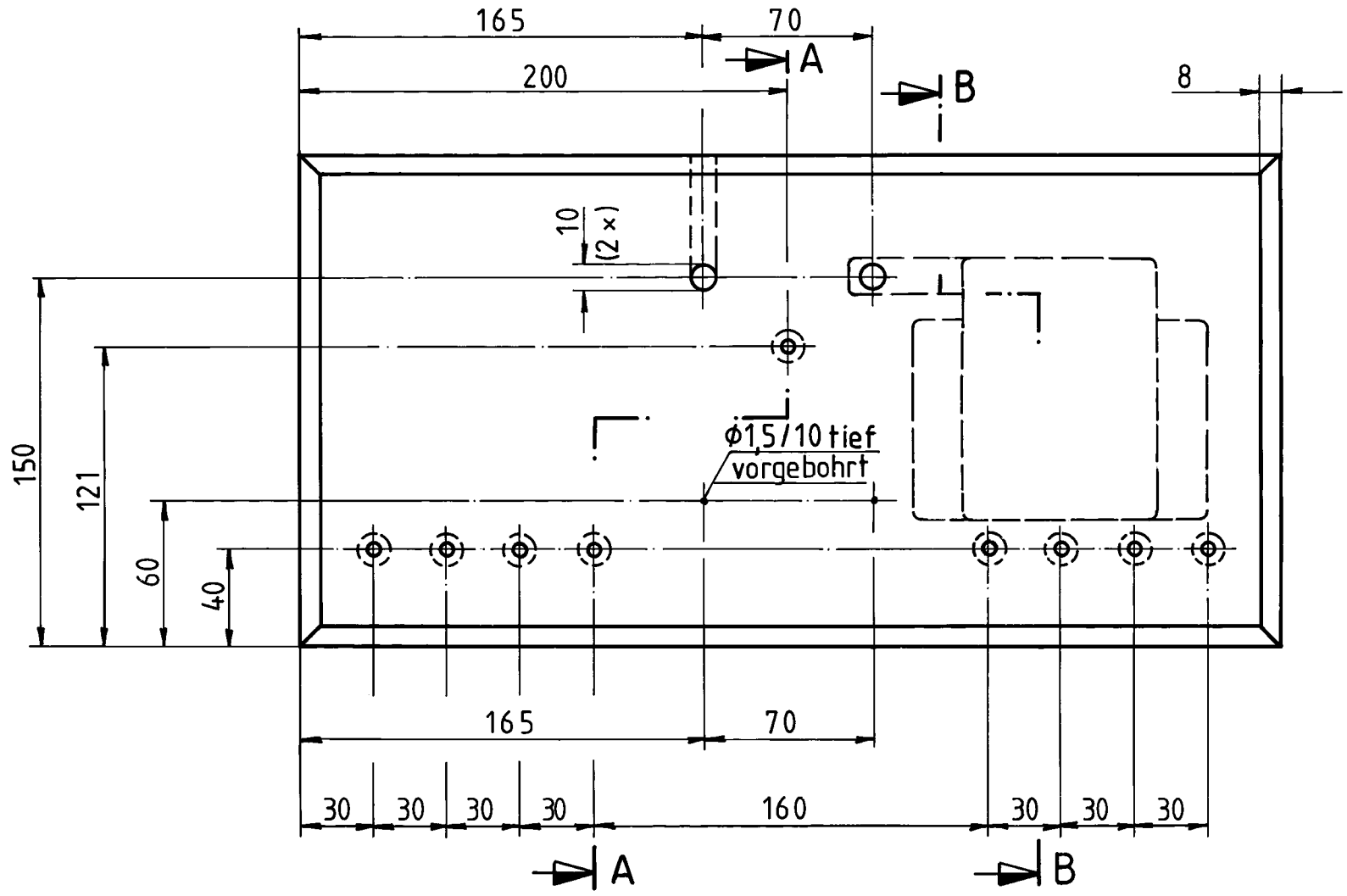
8(9-11)
39
13
14
20

Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mitfeil

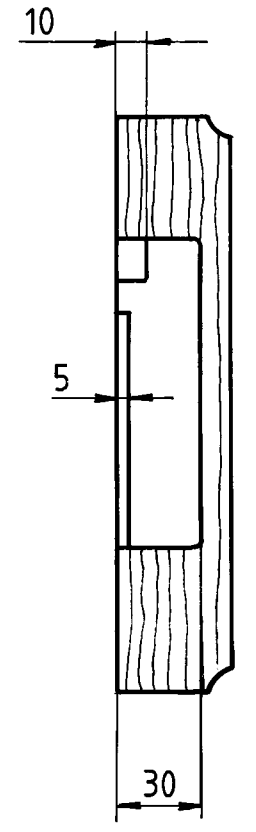
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff / Norm - Kurzbezeichnung	Bezeichnung	Zeichn.
					1:1

Zeichnung: Tesla Motor

54						
53						
52						
51	8	Zylinderschraube	5.8	M 4 × 30		84
50	1	Zylinderschraube	5.8	M 4 × 25		84
49						
48						
47						
46	2	Sechskantschraube	St	5 × 25		571
45	4	Holzschraube	St	3 × 16		96
44	4	Holzschraube	St	3 × 12		97
43						
42						
41						
40						
39	9	Zylinderschraube	8.8	M 3 × 25		912
38	3	Zylinderschraube	8.8	M 3 × 6		912
37						
36						
35						
34	1	Gewindestift	45 H	M 4 × 6		916
33						
32						
31						
30	1	Sechskantmutter	8	M 10		934
29						
28						
27						
26						
25						
24						
23	28	Band	U St 12.03	Bd 0,5 × 16 × 958max.	farblos lackiert	154 i
22	1	Distanzscheibe	St 37 k	Rd 20 × 2	schwarz lackiert	668
21	2	Leiste	Cu Zn 39 Pb 3	Fl 20 × 3 × 120		1759
20	2	Buchse	St 35	Rohr ϕ 8 × 2 × 14,5	schwarz lackiert	2391
19	8	Rändelschraube - NA	Cu Zn	gefertigt aus M 3 × 10		653
18	1	Rotorscheibe	U St 12.03	Bl. 2 × ϕ 260	schwarz lackiert	1541
17	1	Lagerachse	St 37 k	Rd 5h11 × 120		668
16	1	Rotorlagerbuchse	St 37 k	Rd 20 × 23,5	schwarz lackiert	668
15	8	Anschlußbuchse	Cu Zn 39 Pb 3	Rd 10 × 15		1759
14	3	Gewindebuchse	St 37 k	Rd 8 × 16	schwarz lackiert	668
13	3	Buchse	St 35	Rohr ϕ 8 × 2 × 11,5		2391
12	3	Winkel	St 37 k	Fl. 20 × 2 × 62	schwarz lackiert	174
11	1	Achse	St 37 k	Rd 8 × 169		668
10	2	Achse	St 37 k	Rd 8 × 157,5		668
9	1	Lagerbuchse	St 37 k	Rd 20 × 27		668
8	1	Lagerständer kpl. hinten besteht aus (Pos. 9 - 11)			schwarz lackiert	
7	1	Platte	St 37 k	Fl. 40 × 4 × 100		174
6	2	Achse	St 37 k	Rd. 8 × 151,5		668
5	1	Lagerbuchse	St 37 k	Rd. 20 × 27		668
4	1	Strebe	RSt 37-2	Bl. 4 × 35 × 166		1543
3	2	Strebe	RSt 37-2	Bl. 5 × 48 × 166		1543
2	1	Lagerständer kpl. vorne besteht aus (Pos. 2 - 7)			schwarz lackiert	
1	1	Bodenplatte	Mahagoni -Holz	Fl. 40 × 200 × 400		
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Bemerkung	DIN
Stückliste zu Tesla Motor						Maßstab

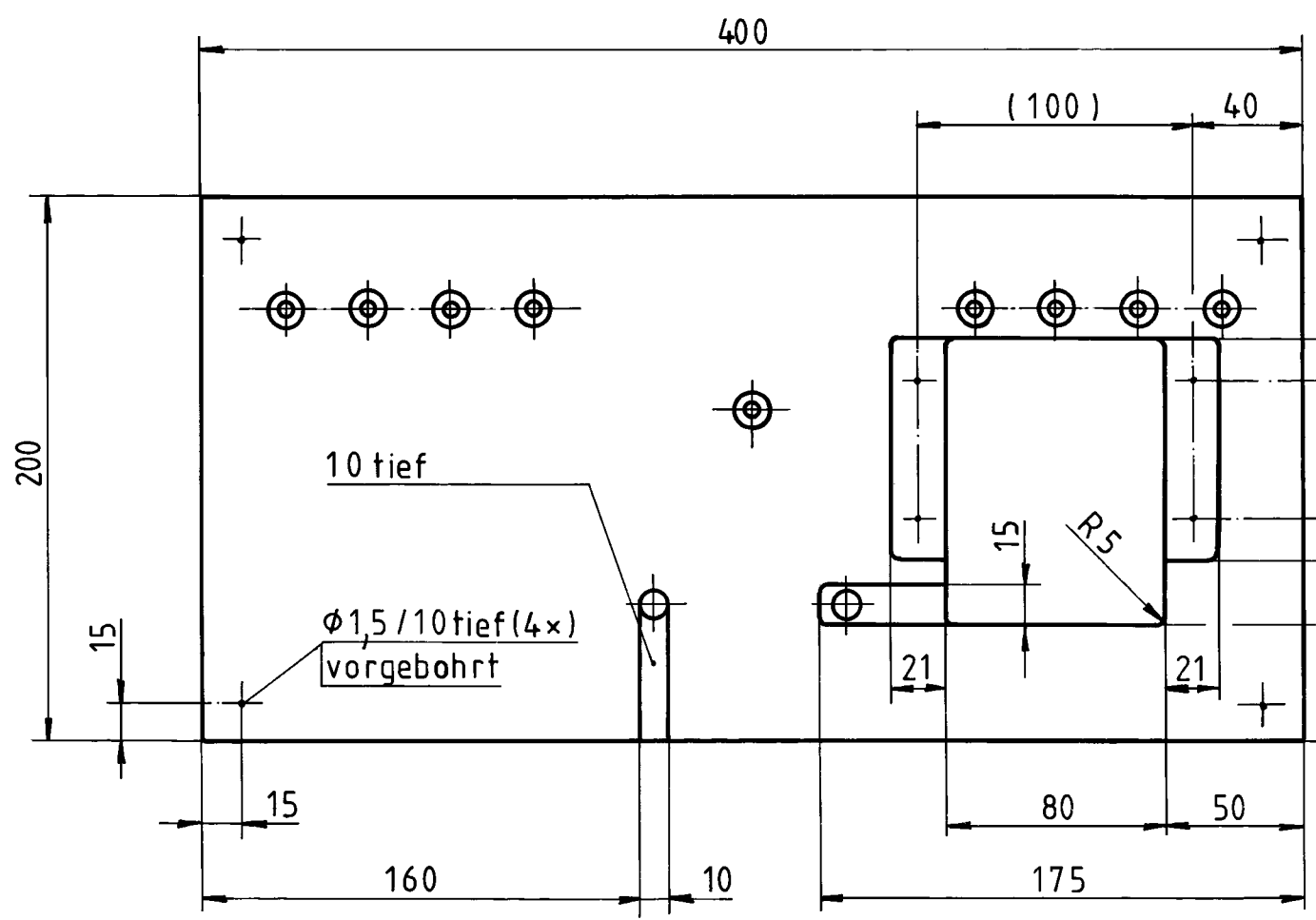
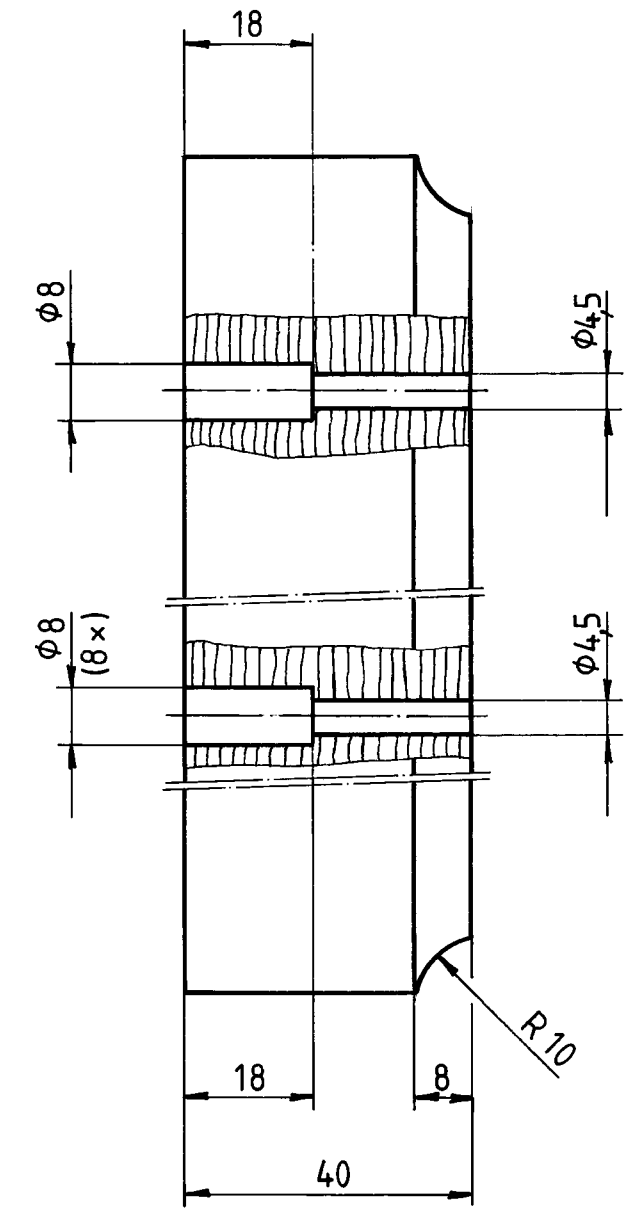


Schnitt B - B



Schnitt A - A

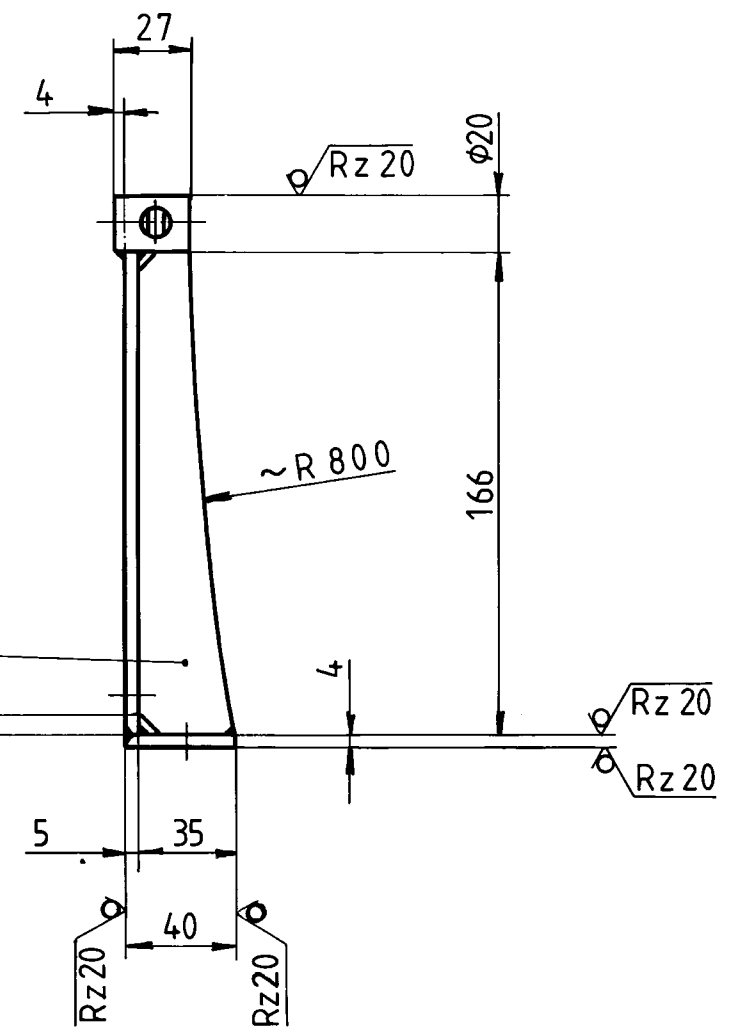
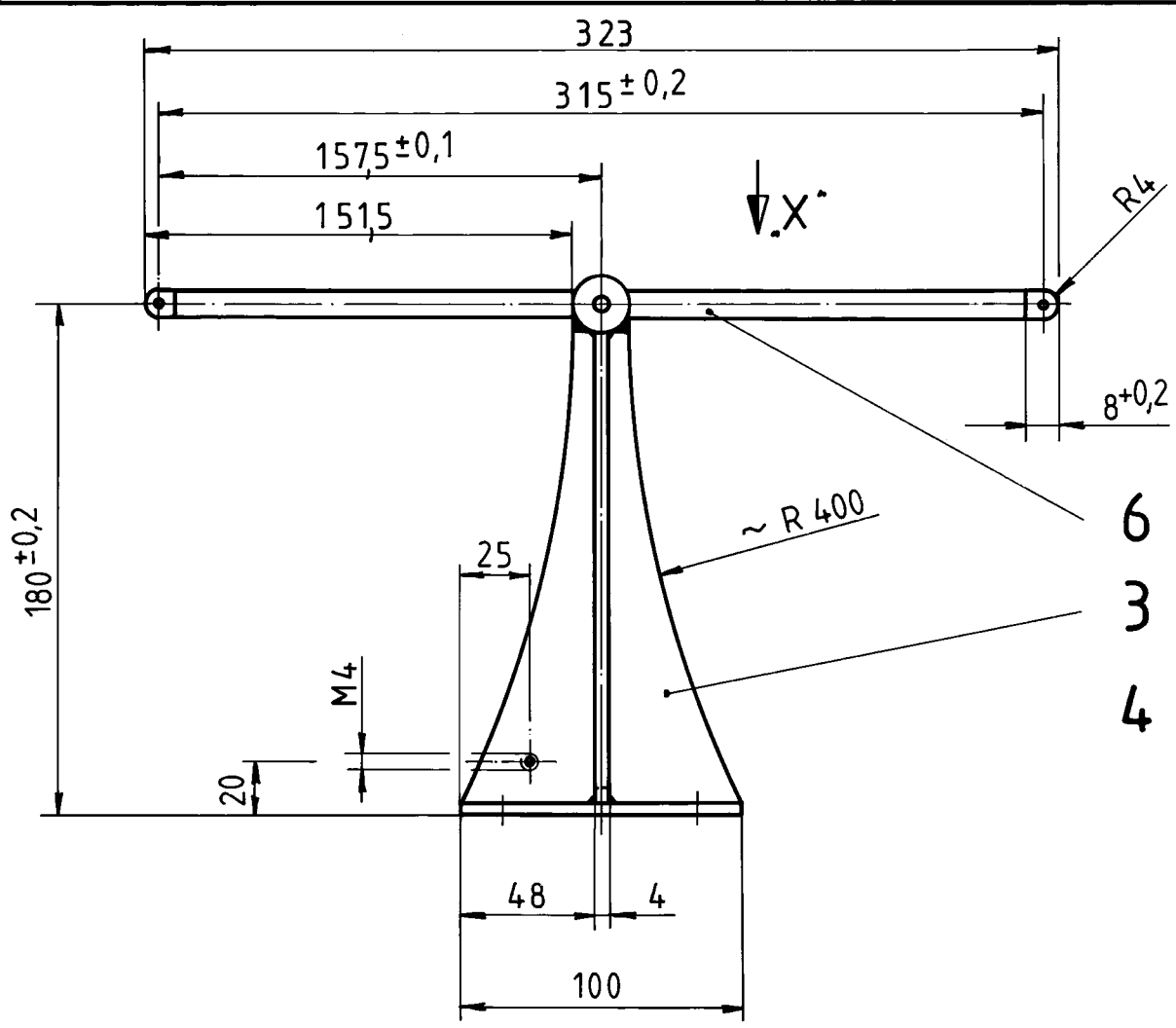
M 1:1



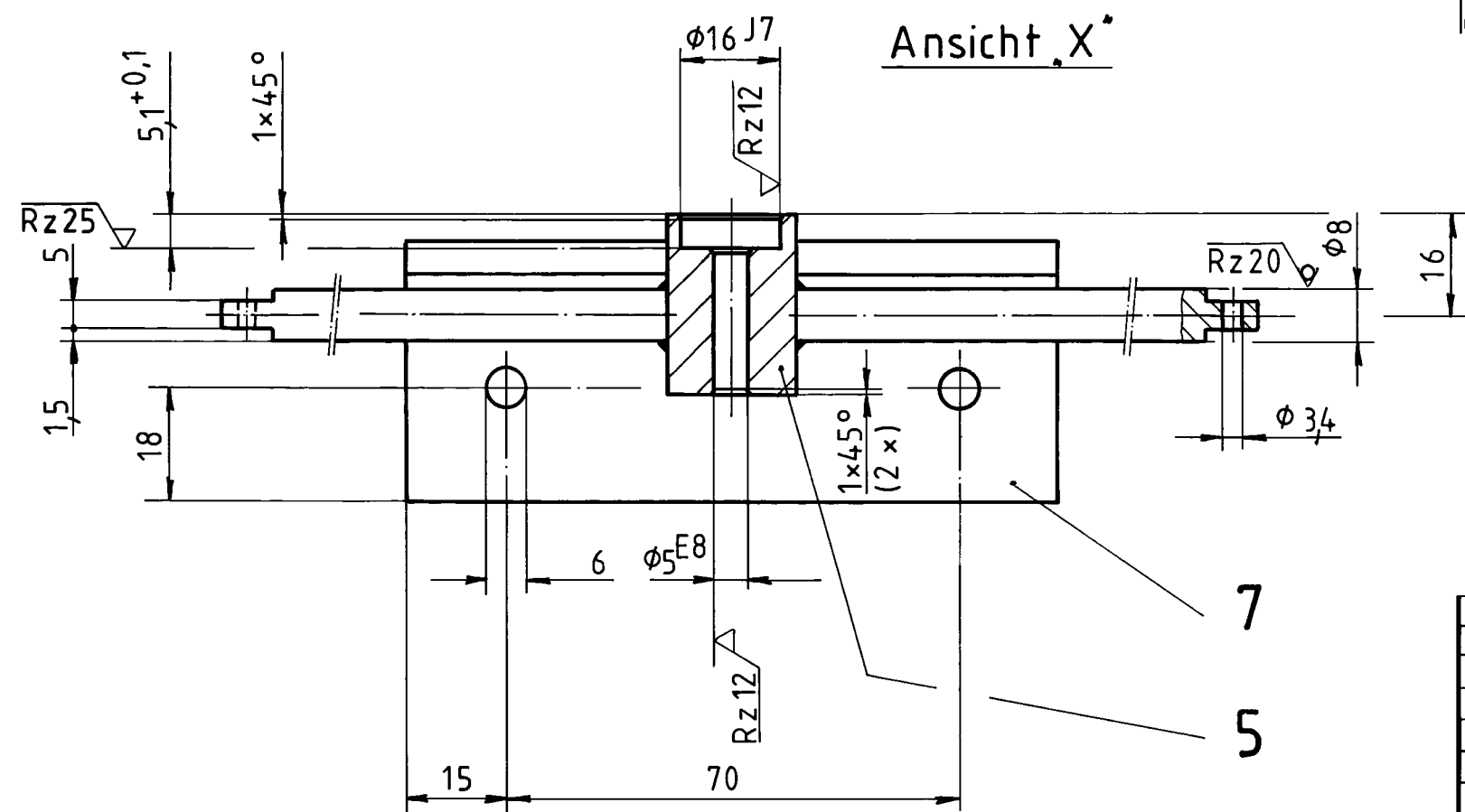
Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff/ Norm - Kurzbezeichnung	Paßmaß	Abmaß
1	1	Bodenplatte	Mahagoni - Holz		
				Bemerkung	
Einzelteil zu Tesla Motor					Maßstab 1:25, 1:1

Kanten gebrochen



Ansicht X



√Rz40 (√Rz20 √Rz12 √Rz25)

Kanten gebrochen
schwarz lackiert

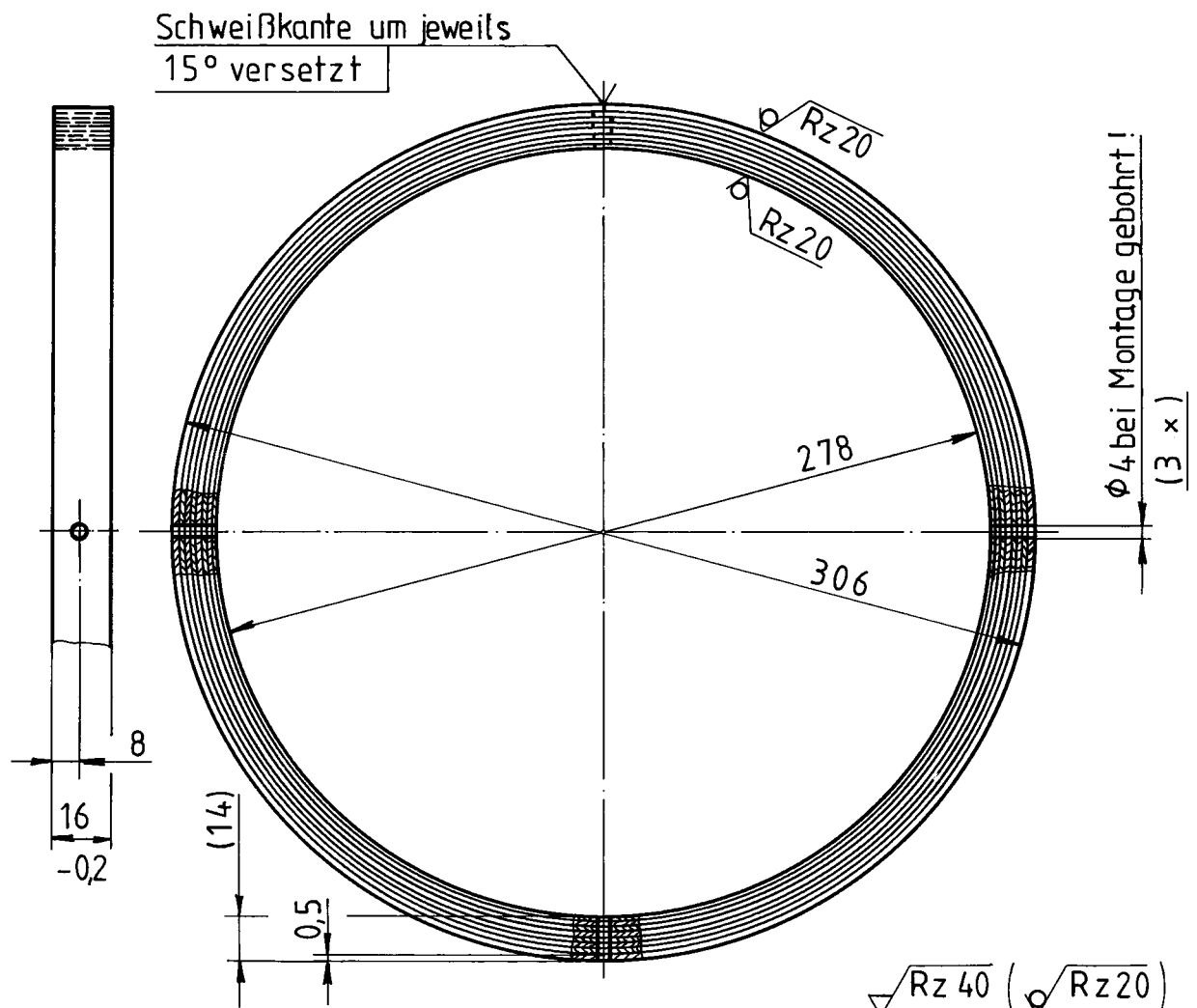
5 E8	+10 -8
16 J7	+38 +20
Paßmaß	Abmaß

Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

7	1	Platte	St 37 k	
6	2	Achse	St 37 k	
5	1	Lagerbuchse	St 37 k	
4	1	Strebe	RSt 37-2	
3	2	Strebe	RSt 37-2	
2	1	Lagerständer kpl. vorne besteht aus Pos. 3 - 7		
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff/Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung

Einzelteil zu Tesla Motor

Maßstab
1:2,5;1:1

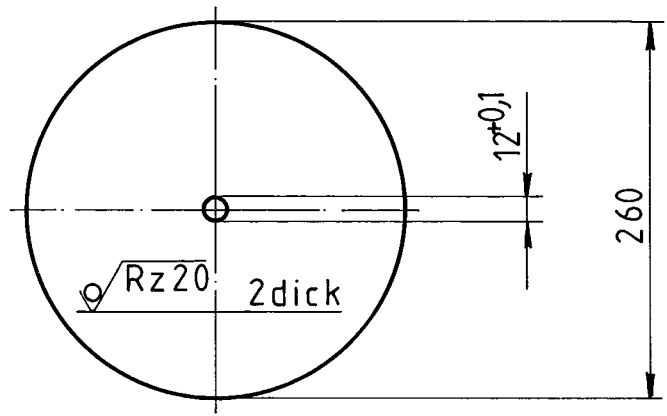


Bemerkung: Jedes Band in gestr. L.: um 3,2 mm länger

gestr. L.: 958 max. 873 min.

√Rz 40 (√Rz 20)

Kanten gebrochen
Jedes Band farblos lackiert!



M 1:5
√Rz 40 (√Rz 20)

Kanten gebrochen
schwarz lackiert

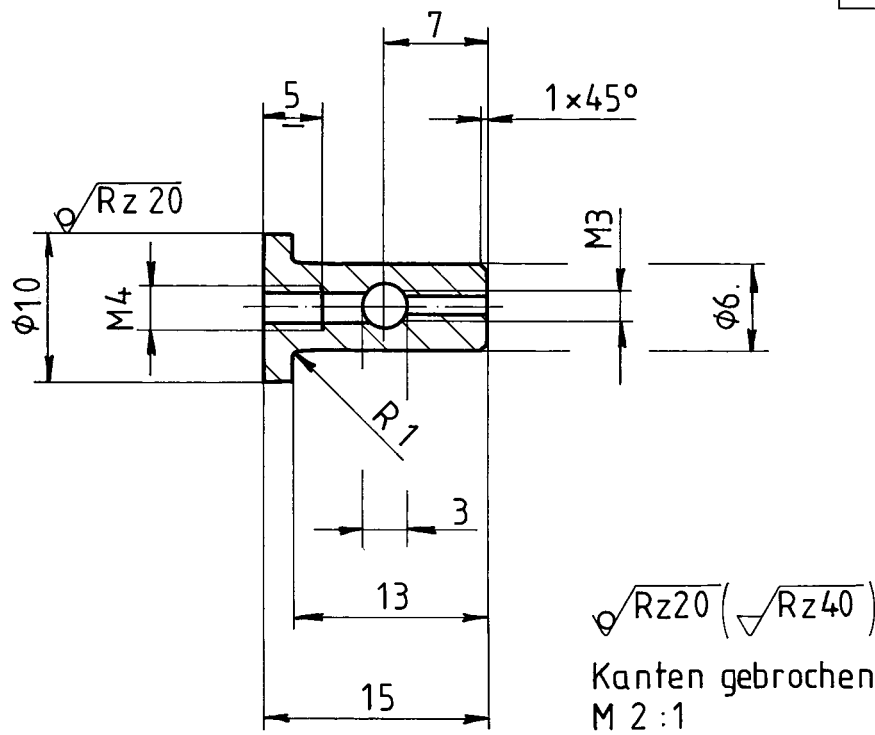
Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff / Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
23	28	Band	U St 12.03	
18	1	Rotorscheibe	U St 12.03	

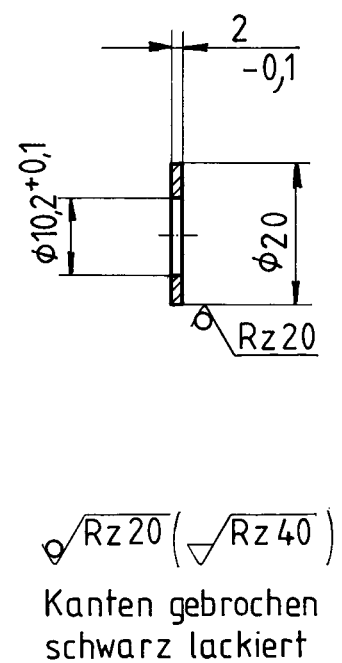
Einzelteile zu Tesla Motor

Maßstab
1:2,5; 1:5

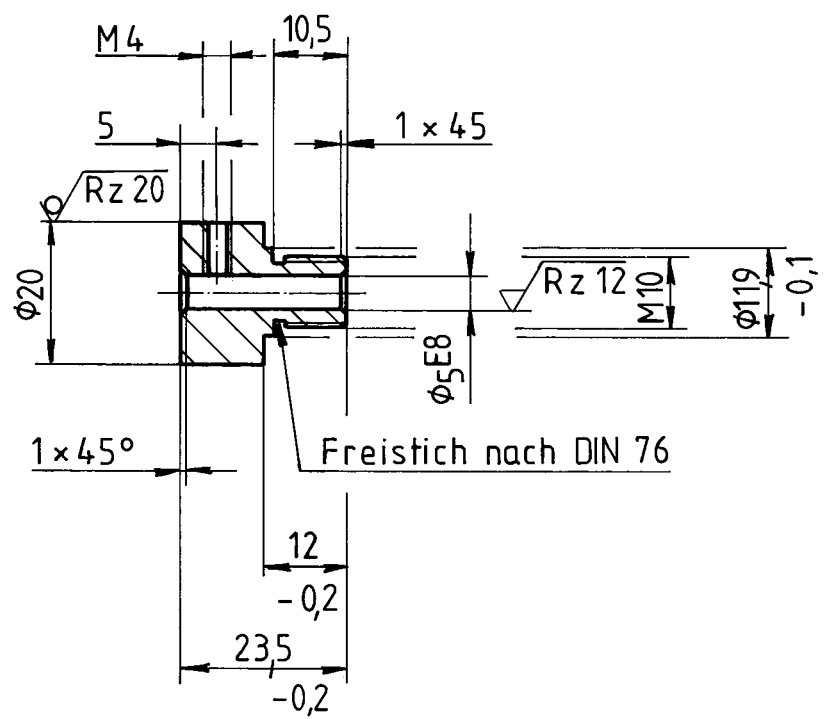
15



22



16



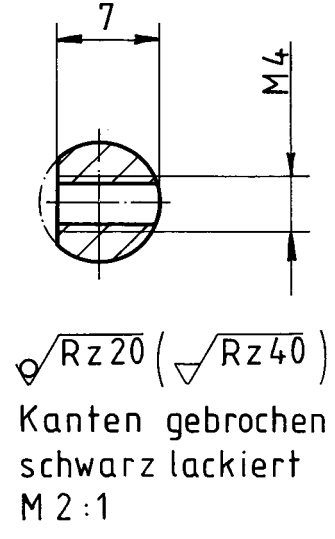
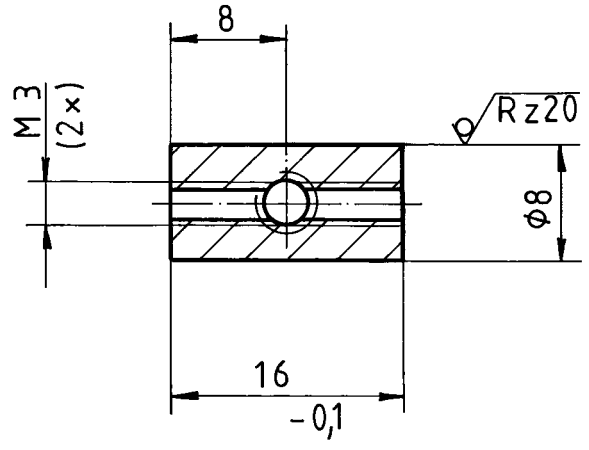
$\sqrt{Rz 20}$ ($\sqrt{Rz 40}$)
Kanten gebrochen
schwarz lackiert

Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

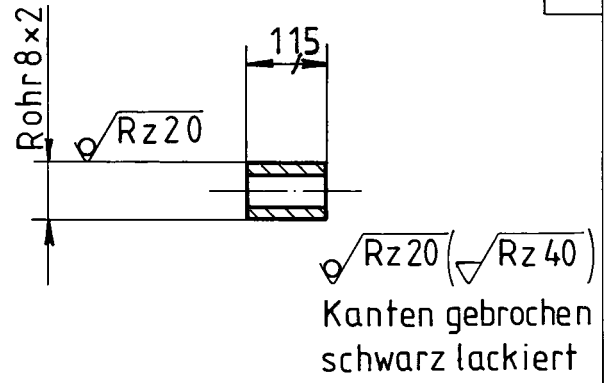
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff/ Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
22	1	Distanzscheibe	St 37 k	
16	1	Rotorlagerbuchse	St 37 k	
15	8	Anschlußbuchse	Cu Zn 39 Pb 3	

Einzelteile zu Tesla Motor

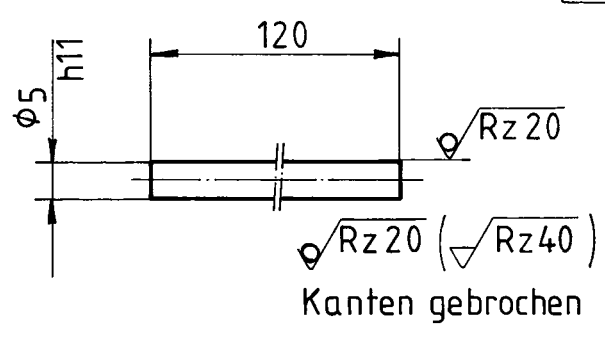
Maßstab
1:1; 2:1



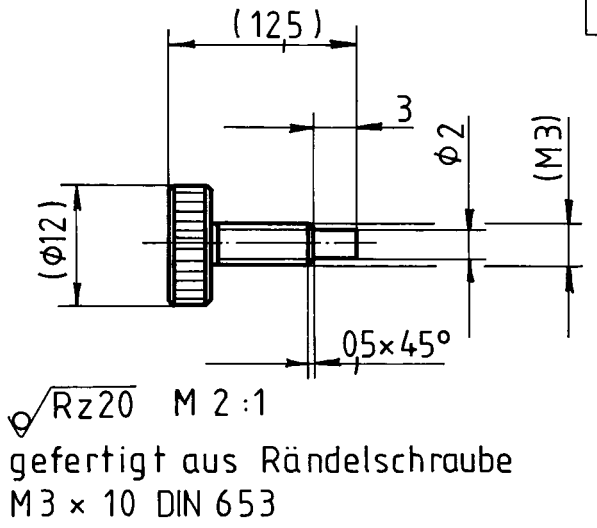
13



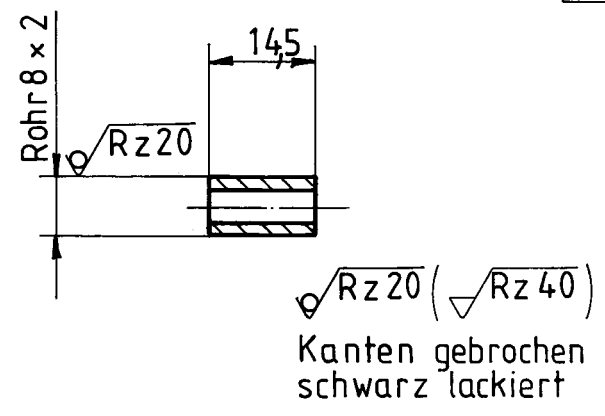
17



19



20



5	h11	0	-75
Paßmaß		Abmaß	

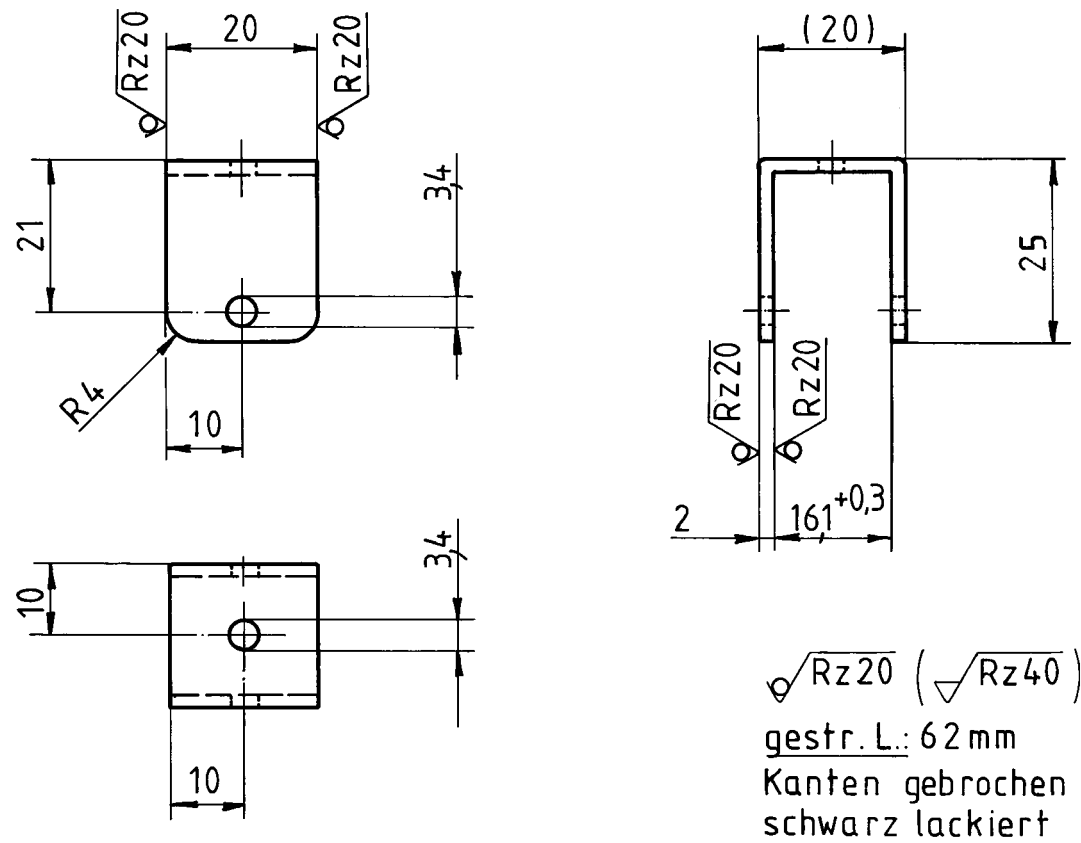
Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff / Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
20	2	Buchse	St 35	
19	8	Rändelschraube -NA	Cu Zn	gef. aus M3 x 10 DIN 653
17	1	Lagerachse	St 37 k	
14	3	Gewindebuchse	St 37 k	
13	3	Buchse	St 35	

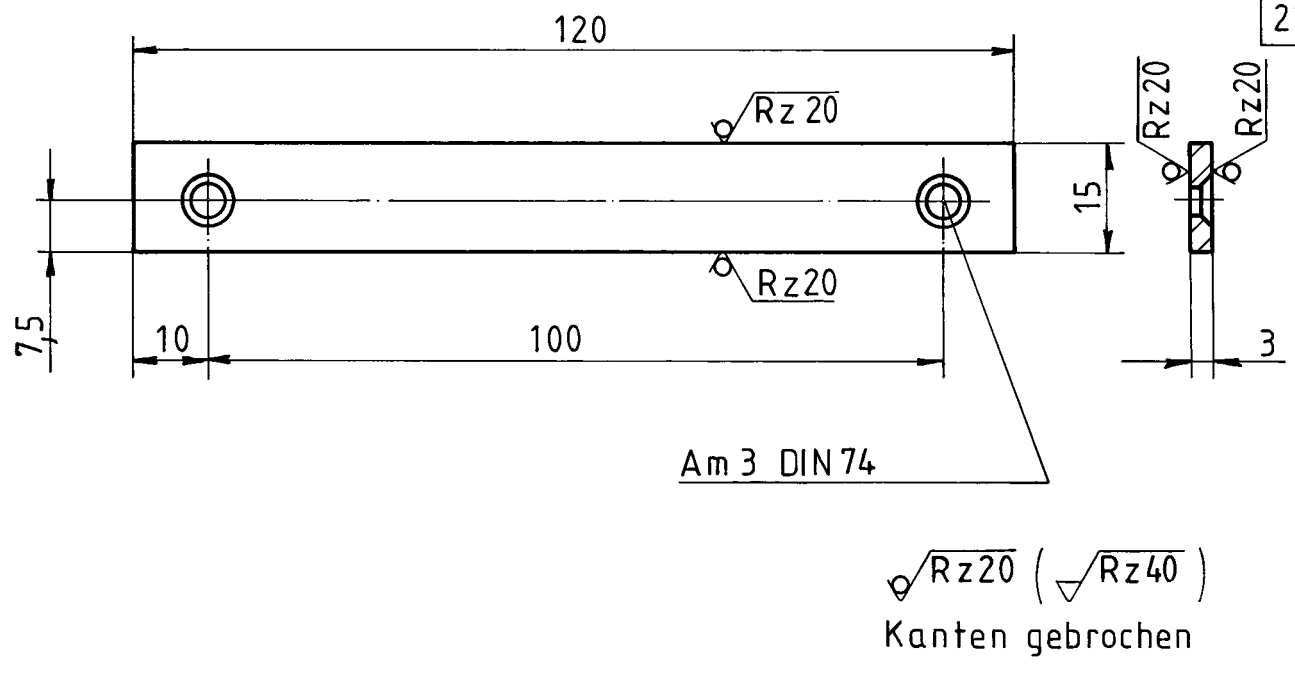
Einzelteile zu Tesla Motor

Maßstab
1:1; 2:1

12



21



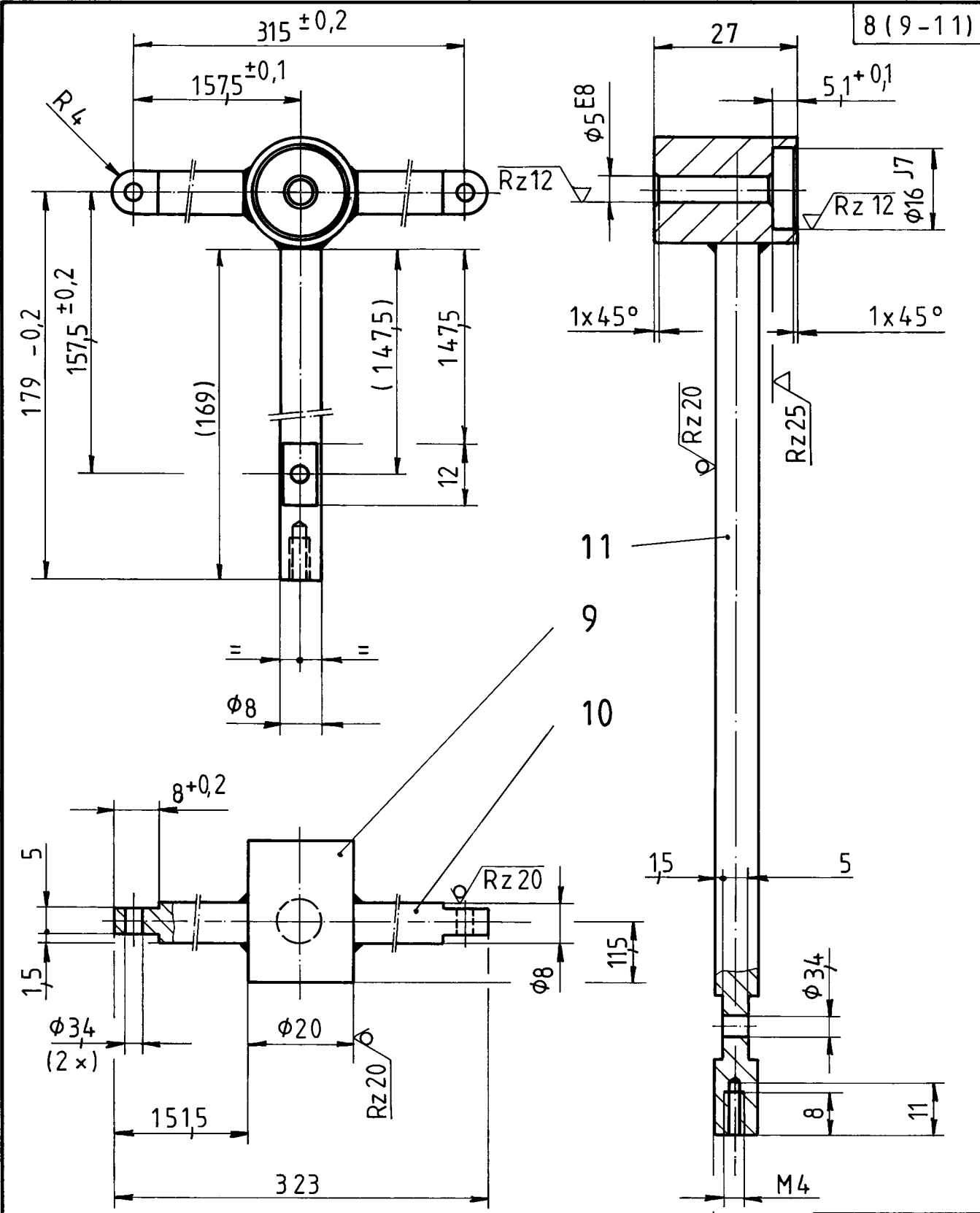
Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff / Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
21	2	Leiste	Cu Zn 39 Pb 3	
12	3	Winkel	St 37 k	

Einzelteile zu Tesla Motor

Maßstab
1:1

8 (9-11)



$\sqrt{Rz40}$ ($\sqrt{Rz20}$ $\sqrt{Rz12}$ $\sqrt{Rz25}$) Kanten gebr. schwarz lackiert

Allgemeintoleranzen nach DIN 7168 mittel

16 J7	+10	-8
5 E8	+38	+20
	Paßmaß	Abmaß

11	1	Achse	St 37 k	
10	2	Achse	St 37 k	
9	1	Lagerbuchse	St 37 k	
8	1	Lagerständer kpl. hinten besteht aus Pos. 9 - 11		
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoff/ Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung

Einzelteile zu Tesla Motor

Maßstab
1:1