

80. Geburtstag Prof. Neidhöfer – Entwicklungs-Highlights bei E-Maschinen 1970-2010



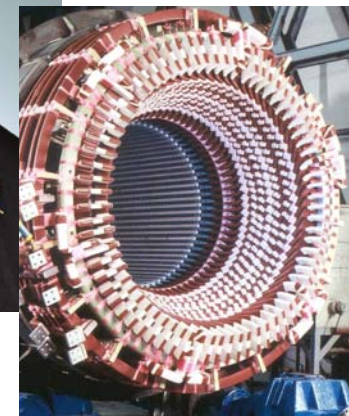
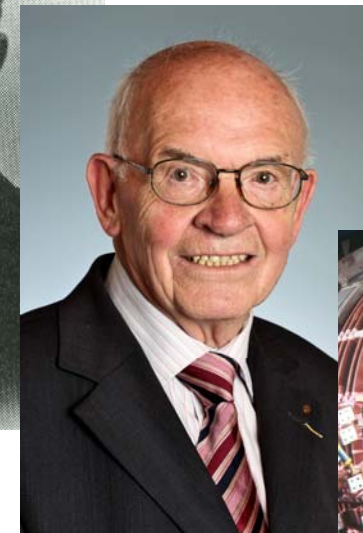
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Festkolloquium - 150. Geburtstag *Michael von Dolivo-Dobrowolsky*
Pionier der Drehstromtechnik, 13.1.2012, TU Darmstadt

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Andreas Binder

abinder@ew.tu-darmstadt.de



- Motivation
- Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930
- Aufbruch während des „Wirtschaftswunders“
- „Highlights“ im Werdegang von *Gerhard Neidhöfer*
- Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze
- Einige Entwicklungstrends
- Zusammenfassung

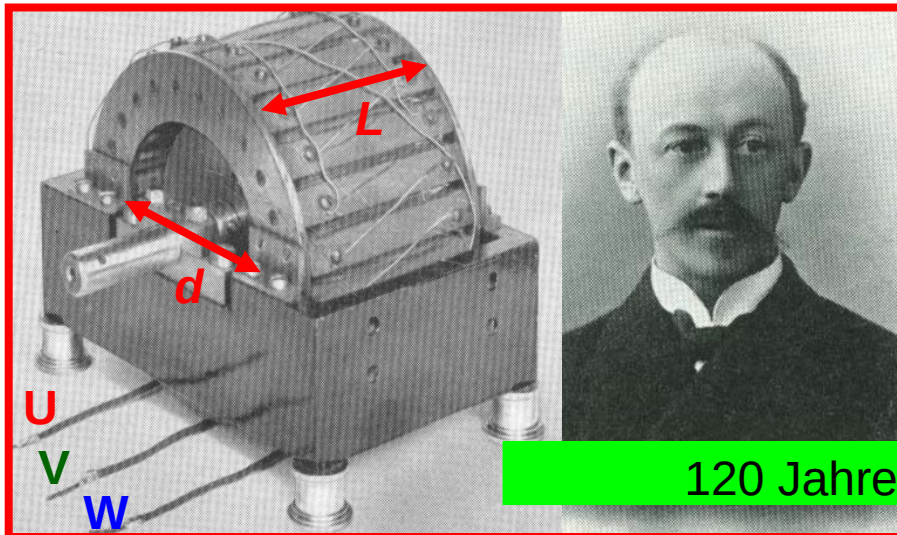
80. Geburtstag Prof. Neidhöfer – Entwicklungs- Highlights bei E-Maschinen 1970-2010



Motivation



Vom ersten Käfigläufer-Asynchronmotor zu modernen magnetisch schwebenden Hochdrehzahl-Großantrieben



120 Jahre



1889 M. v. Dolivo-Dobrowolsky

Erster Käfigläufer-Asynchronmotor
2-polig, 3000/min; 75 Watt, Wirkungsgrad 80%

Stator: 3-phasige *Gramme*-Ringwicklung
in 24 Nuten,

Rotor: Kupferkäfig in 25 geschlossenen
Rundnuten, $d = 75 \text{ mm}$, $l = 75 \text{ mm}$

2009 Läufer eines Asynchronmotors als Antrieb
für Gaspipeline-Kompressoren

2-polig, 15000/min, 4 Millionen Watt

Stator: Hochspannungswicklung,
leistungselektronische Umrichterspeisung

Rotor: magnetisch schwebend gelagert,
Massivrotor, Umfangsgeschwindigkeit 865 km/h

Quellen: a) Neidhöfer, G.; VDE-Verlag, b) ETZ-A, Elektrotechn. Zeitschrift, c) Siemens AG

- Wie ging es von den Anfängen mit den Erfindungen von *M. v. Dolivo-Dobrowolsky* (MDD) und anderen mit den elektrischen Maschinen weiter ?
- Wo stehen wir heute mit der Entwicklung elektrischer Maschinen ?
- Welche „Highlights“ hat der Biograph von MDD, *Hr. Prof. G. Neidhöfer*, während seines Berufslebens in der Großmaschinenentwicklung geleistet ?

80 Jahre Prof. Dr. es sc. Gerhard Neidhöfer



- Geboren 1931 in Zell (Mosel)
- Studium Elektrotechnik/Starkstrom, TH Darmstadt
- Doktorat als Stipendiat, Université de Grenoble (Frankreich)
- 1958-1996: Bei BBC Brown Boveri & Cie., Baden (Schweiz), später ABB, in aufsteigender Funktion: Entwicklung drehender elektrischer Großmaschinen
- 1969-1997: TH Darmstadt: Wahlvorlesung über Elektromaschinenbau
- 1975 Honorarprofessor TH Darmstadt
- Fachaufsätze, Fachgremientätigkeit, intern. Konferenzen
- 1999 IEEE „Fellow“ (USA)
- 2004 Buch „Michael von Dolivo-Dobrowolsky und der Drehstrom“ (VDE-Verlag).
- Weitere Aufsätze zu den Anfängen der Drehstromtechnik (VDE, SEV, IEEE)

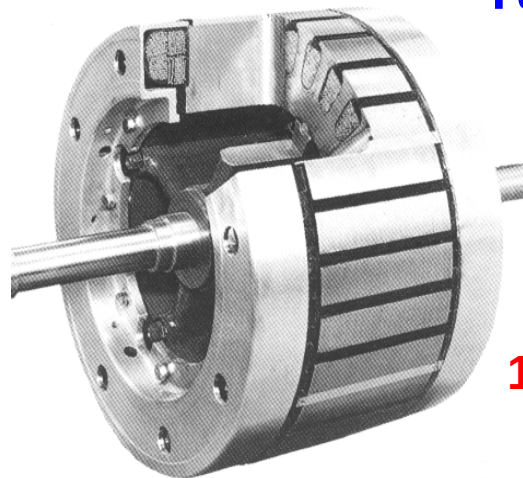
Stürmische Entwicklung bei E- Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930

Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

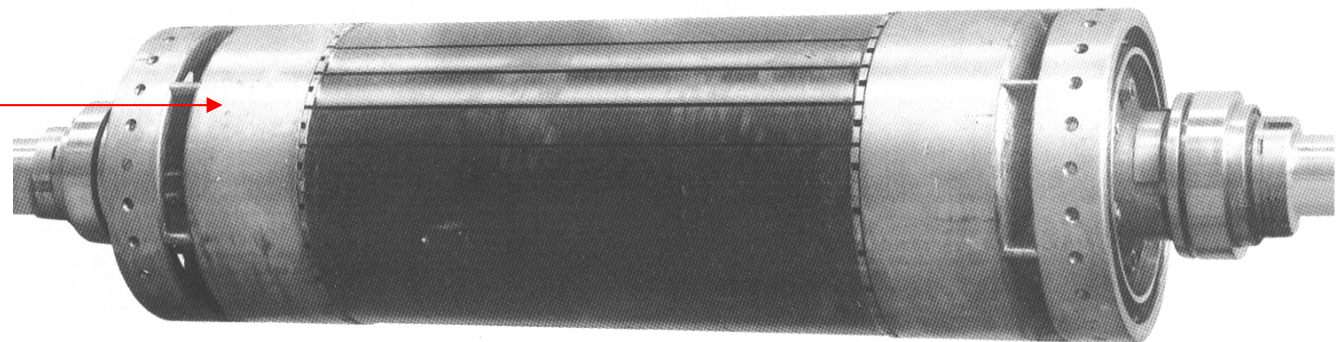
1898: *Charles E. Brown* erfindet den ersten Synchron-Turbogenerator mit Zylinderläufer



1898: Sechspoliger geblechter Zylinderläufer
100 000 Watt = 100 kW

1901: Erster zweipoliger massiver Zylinderläufer für 250 kW,
3900/min, 65 Hz, *Ch. E. Brown*

Amagnetische
Stahlkappen zur
Fixierung der
Kupferdraht-
Läuferwicklung bei
hoher Drehzahl



Quelle: Neidhöfer, G.; ABB-review Sonderdruck

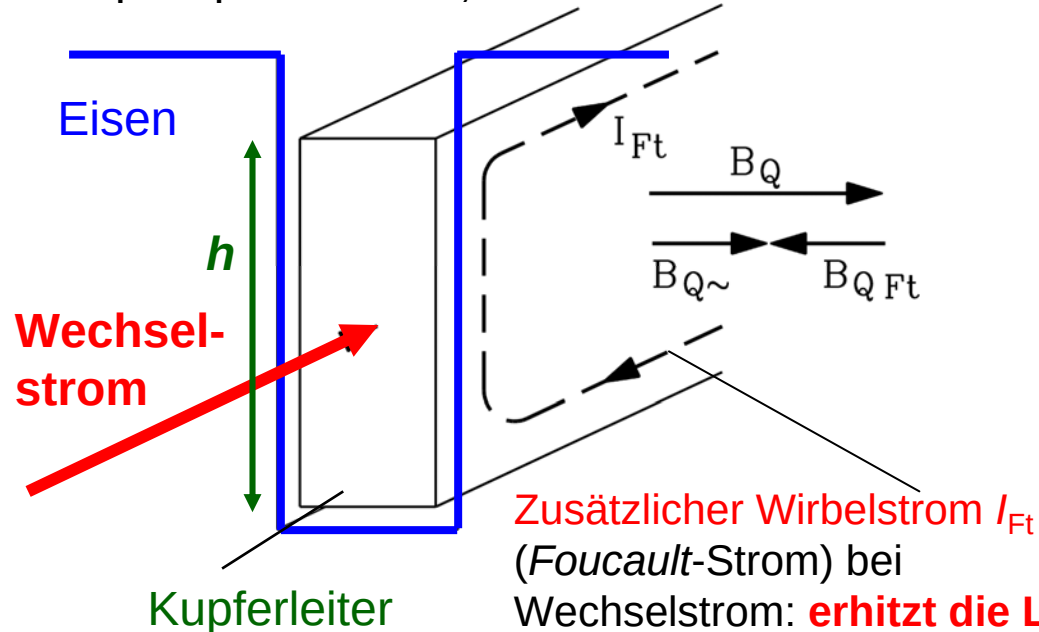
Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Hemmnis bei größeren E-Maschinen: Wechselstrom-Zusatzverluste !

- Größere elektrische Leistungen = höhere elektrische Stromstärken = größere Kupferquerschnitte, ABER DANN ...



Zusätzlicher Wirbelstrom I_{Ft} (Foucault-Strom) bei Wechselstrom: **erhitzt die Leiter zusätzlich!**

Effekt bekannt seit *FOUCAULT* und *WALTENHOFEN*!

- Bei 50 Hz Frequenz des Wechselstroms:

Ab einer Kupferleiterhöhe h von ca. 20 mm nehmen die Stromwärmeverluste TROTZ zunehmenden Kupferleiterquerschnitts WIEDER ZU !

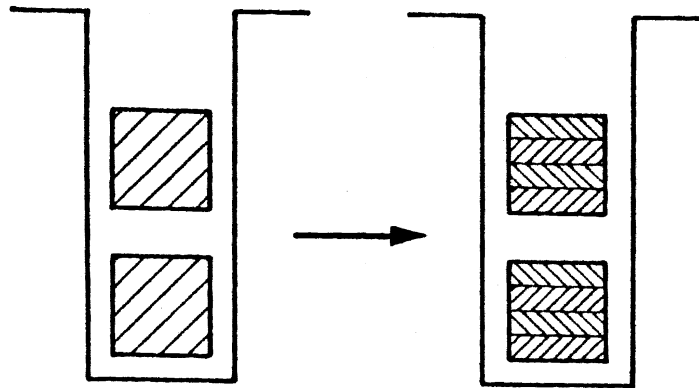
FAZIT: KEINE GROSSEN Maschinen so baubar!

Wer bringt Abhilfe?

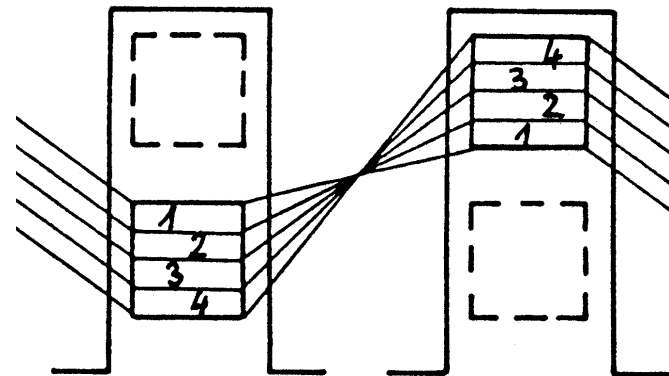


Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930

Ideen zur Verhinderung der Wechselstrom-Zusatzverluste !



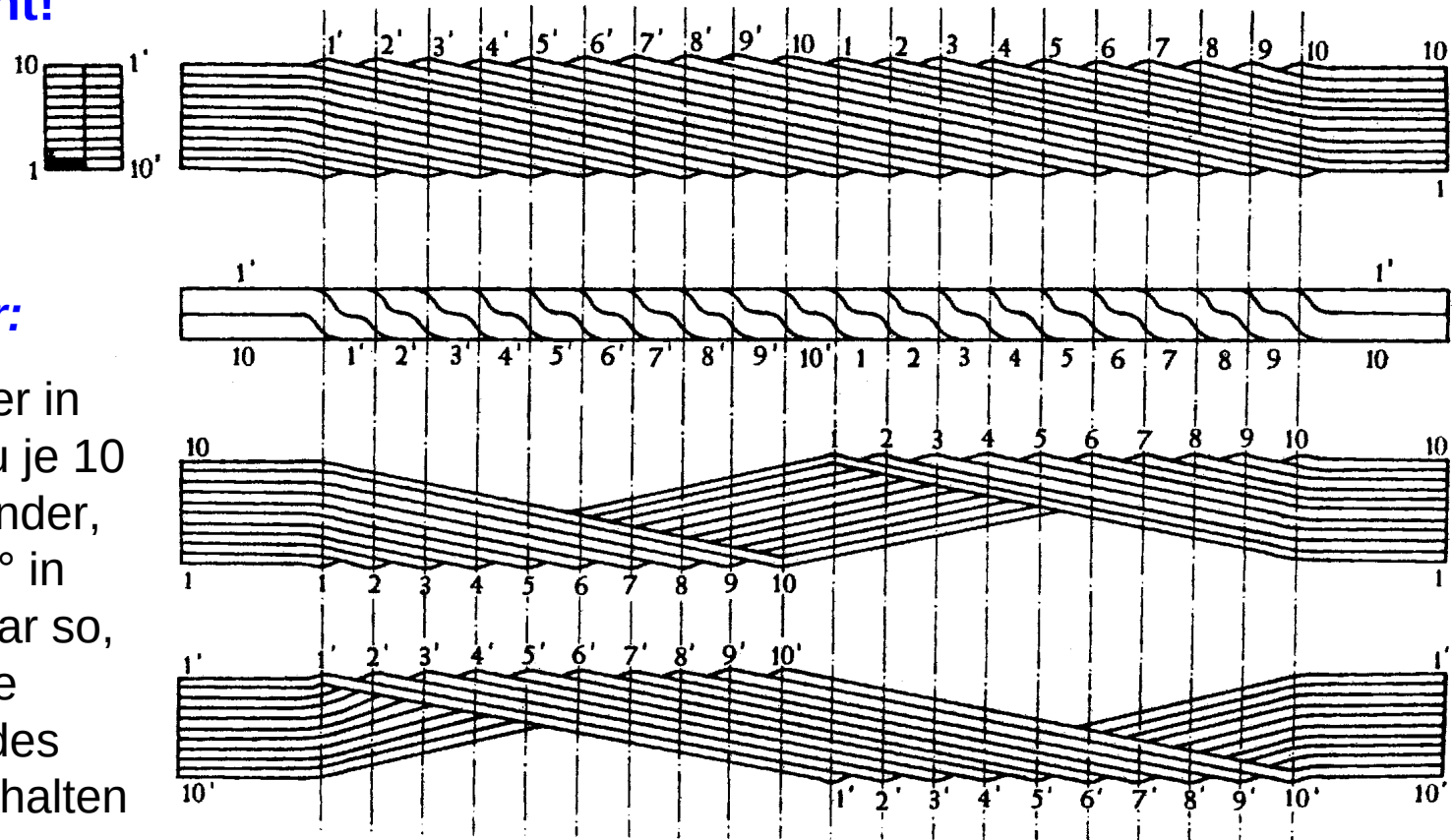
1. Unterteilung der Leiter in parallel geschaltete Teilleiter!



2. Verdrillung der parallelen Teilleiter!

Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930

Ludwig Roebel (1912): Fa. BBC, Mannheim: Deutsches Reichspatent!



Der Drill-Leiter:

z. B. 20 Teilleiter in zwei Stapeln zu je 10 Stk. nebeneinander, Verdrillung 360° in der Nut und zwar so, dass die äußere Rechteckform des Querschnitts erhalten bleibt !

Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930



Ludwig Roebel (1912):
Fa. BBC, Mannheim:
Deutsches Reichspatent!
Der „Roebel“-Stab!

Auch alle heute gebauten Großmaschinen werden mit (tw. verbesserten) Varianten dieses Drill-Leiters gebaut!



Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930



Franklin Punga (1924): Deutsches Reichspatent! Der „Punga“-Stab!

Auch ein Drill-Leiter, aber nicht so praktikabel. Hat sich nicht durchgesetzt.

übrigens:
F. Punga,
Professor für E-Maschinen,
TH Darmstadt, 1920-1949

Vereinheitlichung der Netzfrequenz

- Bis ca. 1920: In elektrischen Teilnetzen unterschiedliche Wechselstrom-Frequenz zwischen 25 Hz ... 60 Hz
- $41.7 \text{ Hz} = 5000 \text{ Polaritätswechsel pro Minute} : (60 \times 2) = 41.6667 \text{ Hz}$
- **In Europa:** Kompromiss 50 Hz (vorgeschlagen vom Österreichischen Verband der Elektrotechniker ÖVE)
- **In den USA und Japan:** Kompromissfrequenz: 60 Hz:
 - Beispiel 1: (Historisches) Wasserkraftwerk **Niagara Falls**:
Kanadische Kraftwerksseite: Generatoren arbeiteten lange mit 25 Hz, wurden später auf 60 Hz umgerüstet.
 - Beispiel 2: 1980: Wasserkraftwerk **Itaipu** am Grenzfluss *Parana*: *Brasilien* (50 Hz), *Paraguay* (60 Hz): 9 der 18 Großgeneratoren fahren mit 50 Hz, die andere Hälfte mit 60 Hz.

Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930



Ab 1930: Elektrisches Netzwerk so groß, dass es als „Verbundnetz“ erste Stabilitätsprobleme hat!

Eine dynamische Maschinen-Theorie ist erforderlich (PARK-Gleichungen)!

- **Große elektrische Drehstrom-Netze** mit vielen einspeisenden Synchron-Generatoren
- Die Läufer der Synchron-Generatoren werden **bei Netzstörungen** zu ihrer Drehzahl **überlagerten Drehschwingungen** angeregt!
- Dadurch kommt es zur **Pendelung der elektrischen Leistungsflüsse** zwischen den einzelnen Netzknoten!
- **Im schlimmsten Fall** verlieren die Läufer ihre magnetische Kraftkopplung mit dem netzgespeisten Magnetfeld ihrer Ständerwicklungen, und **müssen vom Netz getrennt werden**.
- **Die Folge:** Netzteilabschaltungen oder Netzzusammenbruch = **BLACK-OUT!**



Stürmische Entwicklung bei E-Maschinen in den „frühen“ Jahren bis 1930

Blackout *Italien* 28.9.2003



Aufbruch während des „Wirtschaftswunders“

Die „Welt“ nach 1945

- Ab 1950: **Rasch steigender Strombedarf:** Wiederaufbau nach dem 2. Weltkrieg, steigende Weltbevölkerung, rasche Industrialisierung und Elektrifizierung
- **Zweiter Weltkrieg** ist schwerer Rückschlag für *Europa*, aber *USA* „boomt“
- **Mitte der 1950-er:** Kaltwalzverfahren zur Herstellung von verlustarmen Elektroblechen in *USA* entwickelt und patentiert, kornorientierte Hi-B-Bleche für Großtransformatoren
- **Gigantische Kraftwerksprojekte** werden in den USA (Wasserkraft & thermisch) in Betrieb genommen: *Boulder Dam, Grand Coulee, Tennessee Valley Authority*

Aufbruch während des „Wirtschaftswunders“

**1955: 204 MVA Schenkelpol-
Synchronmaschine als Motor-
Generator zum Pumpspeicher-
Betrieb**
(damals einer der weltgrößten
E-Maschinen)

Taum Sauk
Pumpspeicher-Kraftwerk,
Ozark Mountains,
150 km südwestlich von
St. Louis, USA

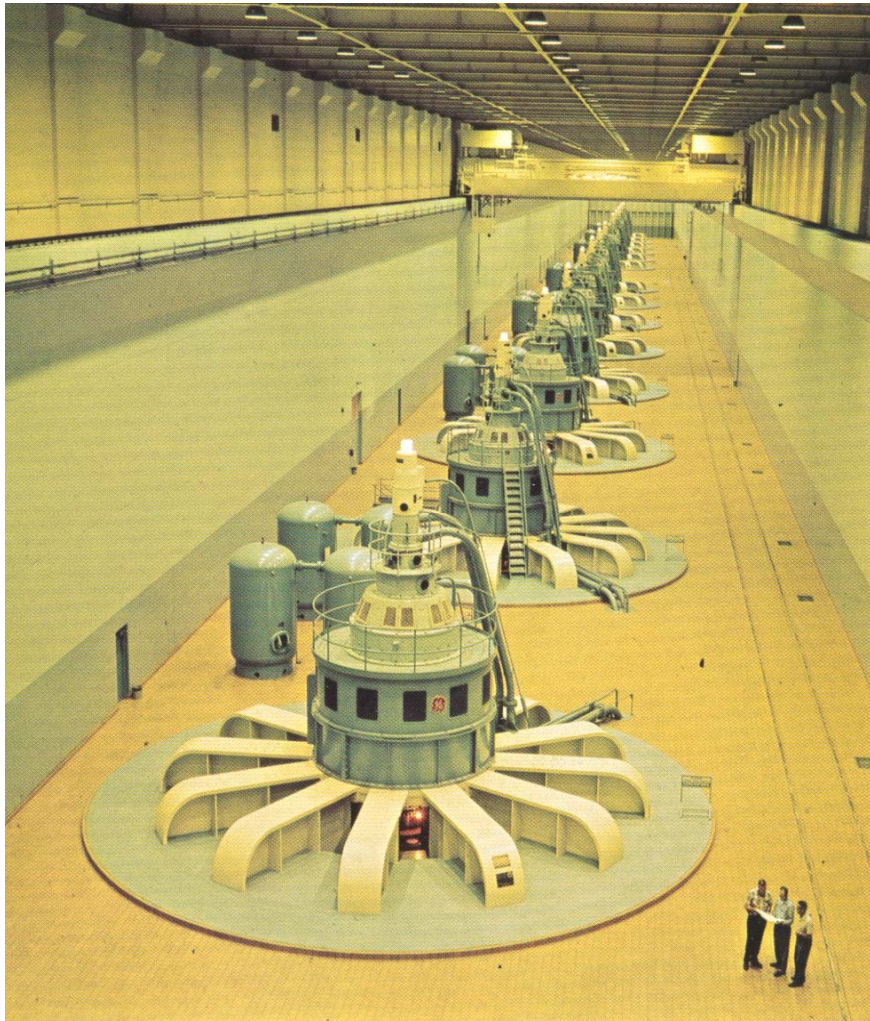
Traglager für
den schweren
Rotor

Product of experience:
204,000-kva/240,000-hp
reversible generator/motor.

Quelle: General Electric,
Schenectady, USA



Aufbruch während des „Wirtschaftswunders“



**Ca. 1955: Schenkelpol-
Synchrongeneratoren mit einer
Scheinleistung 82.1 MVA,
Antrieb durch *Kaplan-Turbinen*,
am *Columbia River***

Flusskraftwerk *Dalles, Columbia River*,
USA:

14 Synchrongeneratoren mit vertikaler
Welle, je 82.1 MVA, 60 Hz, 85.7/min,
84-polig

*Quelle: General Electric, Schenectady,
USA*

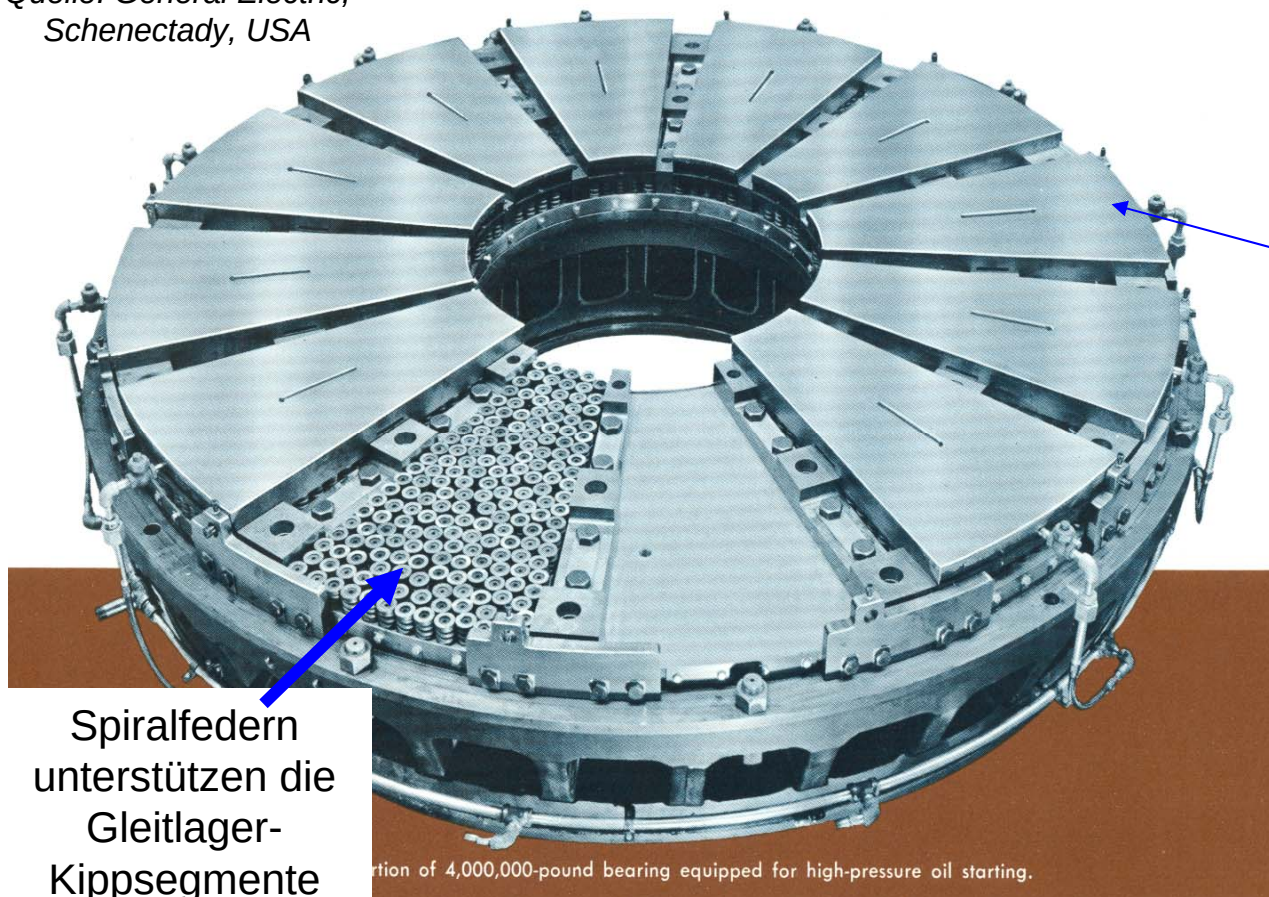


Hoher Entwicklungsbedarf bei großen Synchron-Kraftwerksgeneratoren

- Große Synchrongeneratoren mit vertikaler Welle für Wasserturbinen benötigen **spezielle hydrodynamisch geschmierte Öl-Gleit-Trag- und Führungslager** (Entwicklung bei *General Electric, USA*)
- **Entwicklung der Kernkraft für friedliche Energienutzung in den USA und Großbritannien:** Große zwei- und vierpolige Synchrongeneratoren für den Antrieb durch Dampfturbinen werden benötigt (Turbogeneratoren)
- **Neuartige Kühlverfahren zur Abfuhr der Stromwärmeverluste sind nötig:** Direkte Wasserkühlung in Hohlleitern, Wasserstoffgaskühlung!

1953: Weltgrößtes Traglager für 2000 Tonnen Tragkraft

Quelle: General Electric,
Schenectady, USA



Spiralfedern
unterstützen die
Gleitlager-
Kippsegmente

- Fest stehender Teil des (1953 weltgrößten) ölgeschmierten Traglagers für 2000 Tonnen Tragkraft!
- Eingesetzt in den Wasserkraft-Generatoren des Kraftwerks *McNary* am *Columbia-River*, USA
- Leistung je Generator: 73.6 MVA, 60 Hz, 85.7/min, 84-polig

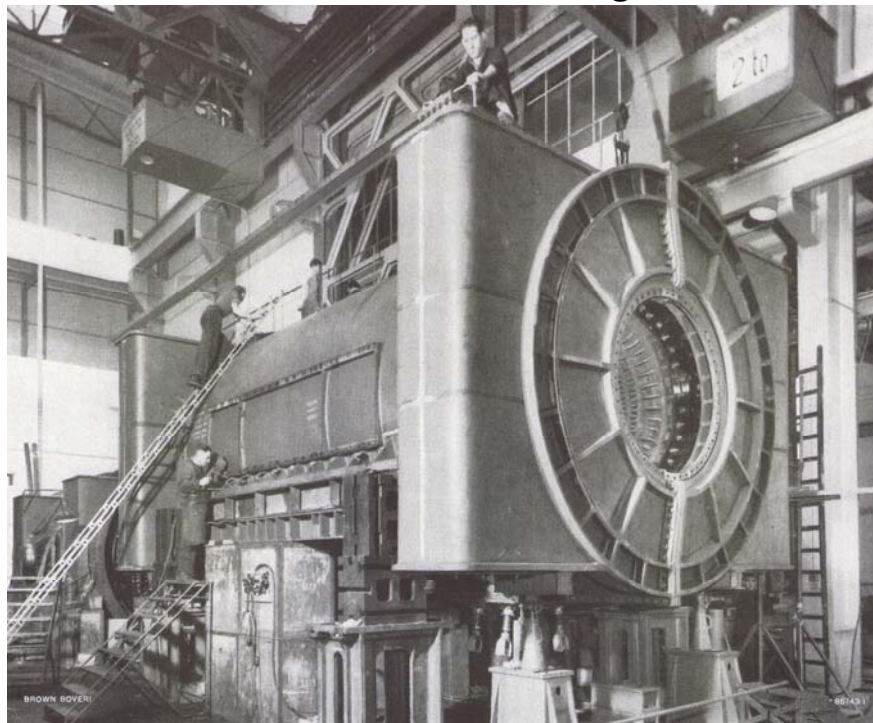
tion of 4,000,000-pound bearing equipped for high-pressure oil starting.

„Highlights“ im Werdegang von *Gerhard Neidhöfer*

„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer

- Großer Energiebedarf im Europa der Nachkriegszeit:

Die größten zweipoligen Synchrongeneratoren für thermische Kraftwerke hatten Einheitsleistungen unter 200 MVA. Größere Maschinen konnten nur durch eine deutlich intensivierte Kühlung der Verlustwärme erreicht werden.



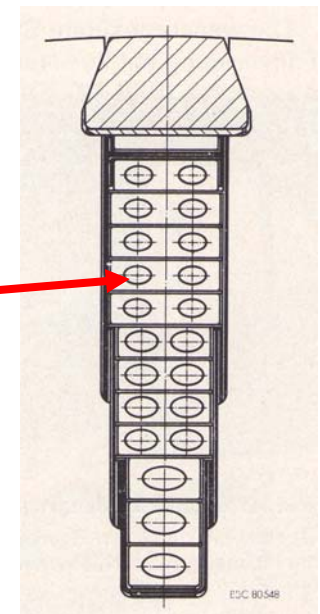
Stator für Kraftwerk *Weisweiler*, RWE

**1954: Bau eines Stators
eines Turbogenerators
187.5 MVA, 3000/min**

Kunde: *RWE, Deutschland*

Rotor: Erregerwicklung
direkt mit Wasserstoffgas
gekühlt

Stator: Drehstromwicklung
indirekt mit Wasserstoffgas
gekühlt



Quelle: *BBC (heute Alstom Power), Mannheim,
Deutschland, Foto G. Neidhöfer*

„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer



Prof. Eugen Wiedemann:

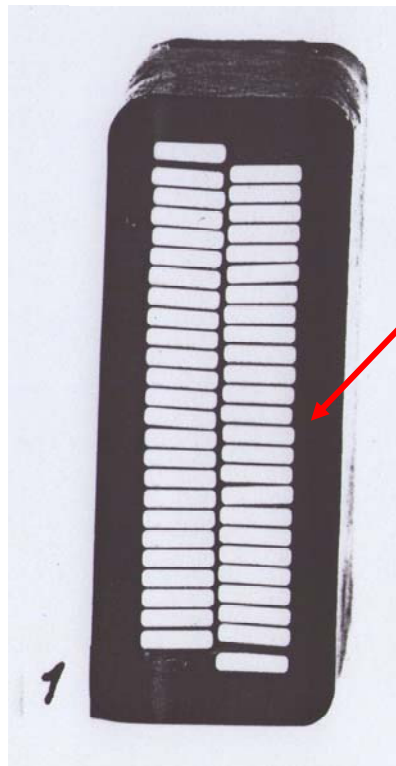
Direktor der *BBC Baden/Schweiz* und Honorarprofessor an der *TH Darmstadt* („Konstruktion elektrischer Maschinen“, siehe dazu auch das berühmte Buch „*Wiedemann-Kellenberger*“, Springer, 1967)

- holt 1957 *Gerhard Neidhöfer* nach *Baden* zu einer externen Diplomarbeit „Untersuchung über die günstigsten Verhältnisse bei direkter Kupferkühlung in Hohlleitern“
- verschafft ihm ein Stipendium an die *Université de Grenoble, Frankreich*
- Nach dem überraschenden Tod von *Prof. Wiedemann* im März 1969 während einer Vortragsreise in *Moskau* und *Leningrad* übernimmt *G. Neidhöfer* dessen Vorlesungsaktivität an der *TH Darmstadt*

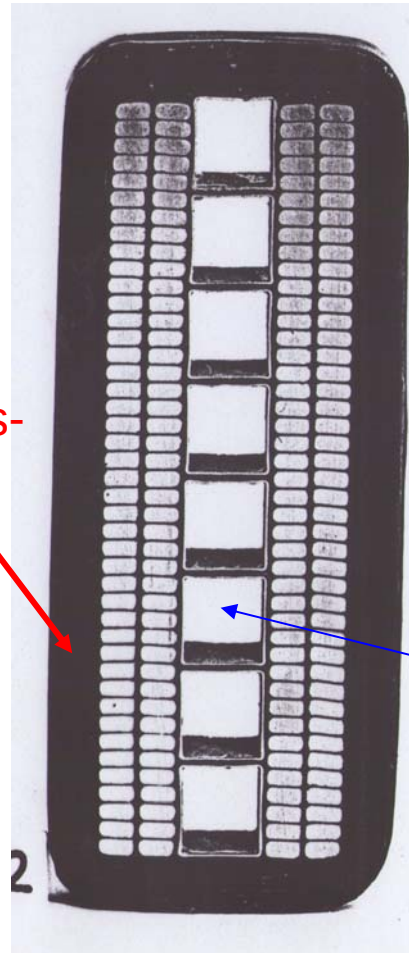


„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer

Schnitt durch einen
indirekt gekühlten
hochspannungs-
isolierten *Roebel*-Stab



Hoch-
spannungs-
isolierung



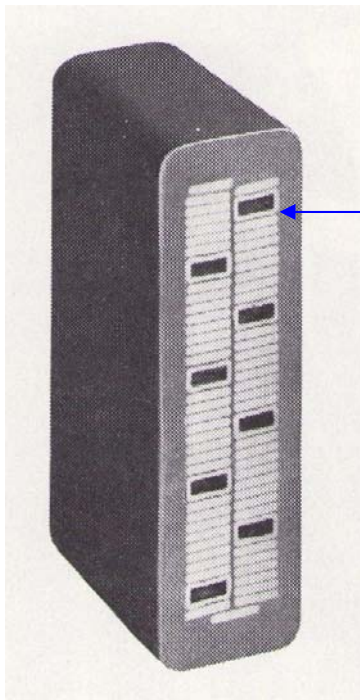
Von der **indirekt** zur **direkt** mit
Wasserstoff-Gas gekühlten
Stator-Drehstromwicklung

Der Weg von *Westinghouse* und
Siemens:

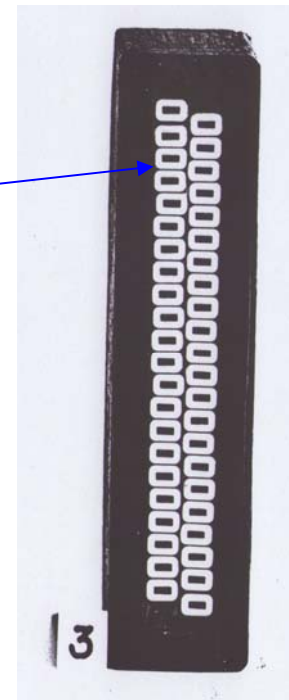
Schnitt durch einen Doppel-*Roebel*-
Stab mit dazwischen liegenden
Kanälen für das Wasserstoffgas zur
direkten Leiterkühlung

Quelle:
KWU (heute Siemens AG), Mülheim, Deutschland

Direkte Leiterkühlung mit Kühlflüssigkeit



Quelle:
BBC (heute Alstom Power),
Mannheim, Deutschland



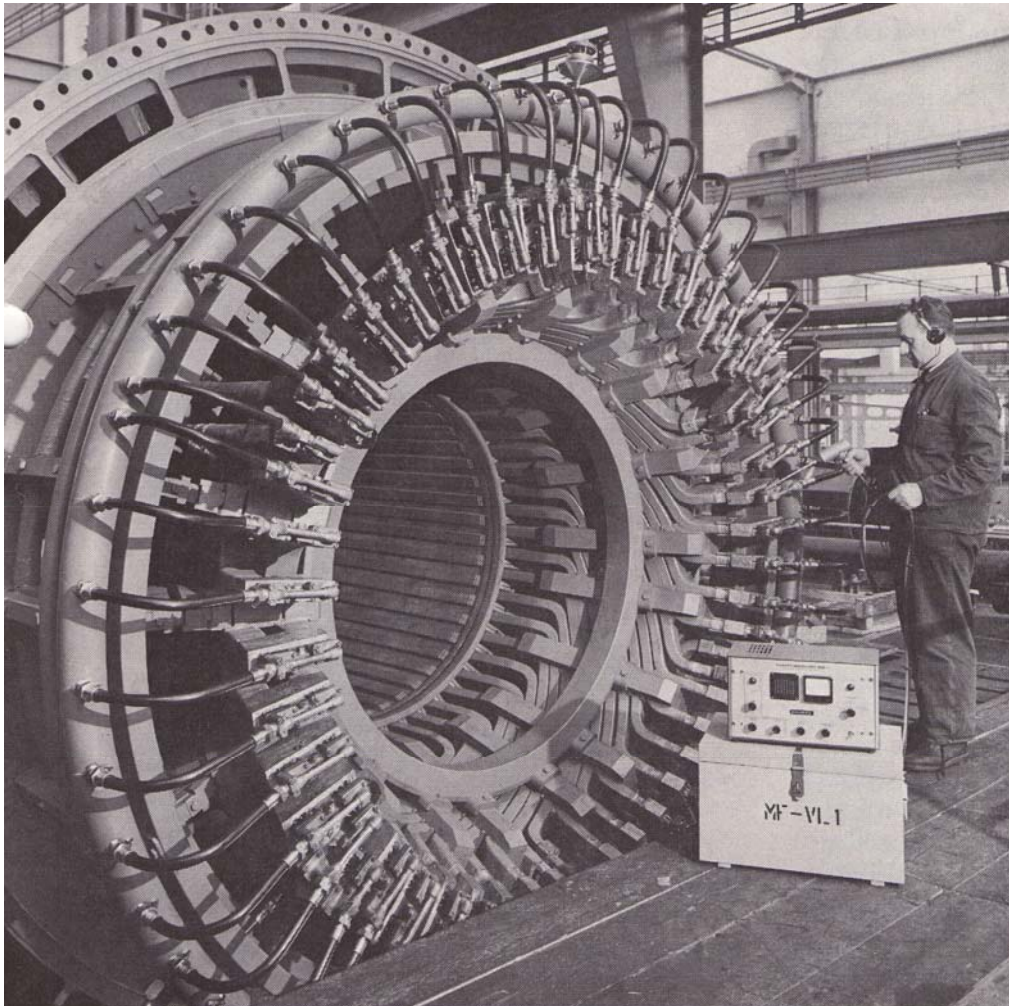
Quelle:
KWU (heute Siemens AG),
Mülheim, Deutschland

Der Weg von BBC (G. Neidhöfer):

Einzelne Teilleiter werden als
Hohlleiter ausgeführt

Der Weg von General Electric und AEG:

Alle Teilleiter werden als Hohlleiter ausgeführt



Um 1970:

Direkte Leiterkühlung mit Kühlflüssigkeit

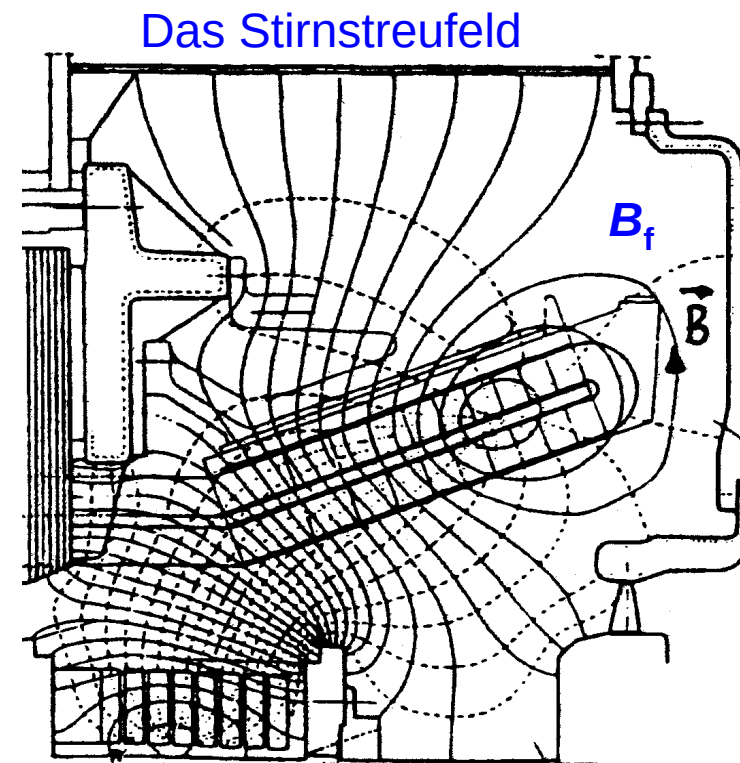
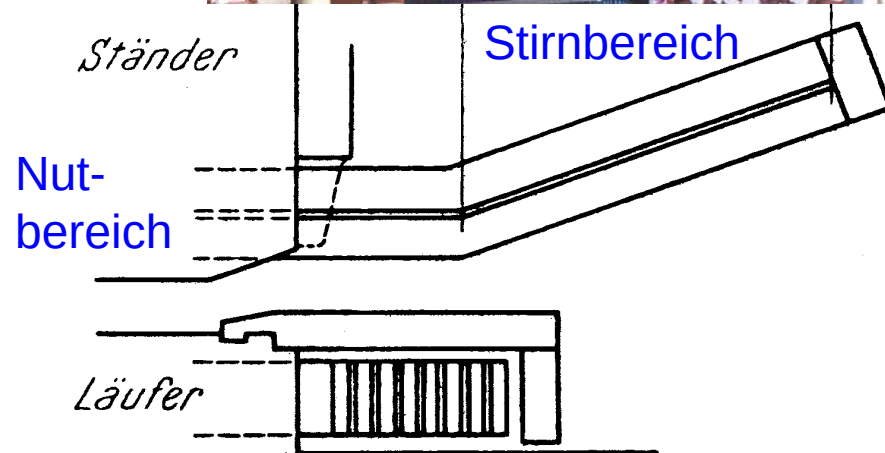
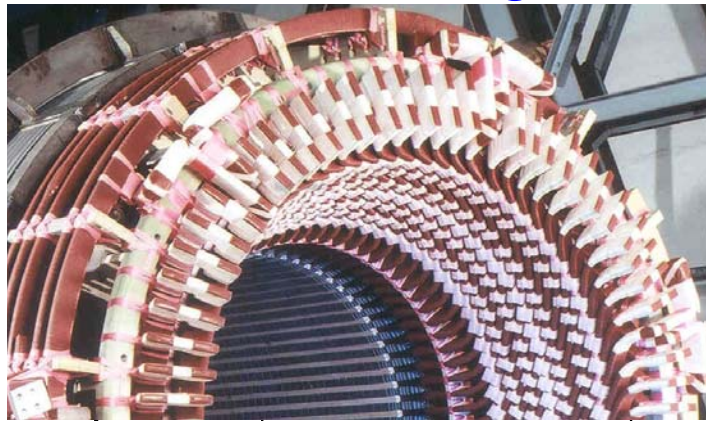
- Eine außen liegende Pumpe fördert Wasser mit hoher Reinheit über Teflon-Anschlussschläuche im geschlossenen Kreislauf durch die Hohlleiter
- Dies ist auch Stand der Technik bei den weltgrößten Turbo-
generatoren 2010 mit 2000 MVA

Quelle:
BBC (heute Alstom Power), Mannheim,
Deutschland

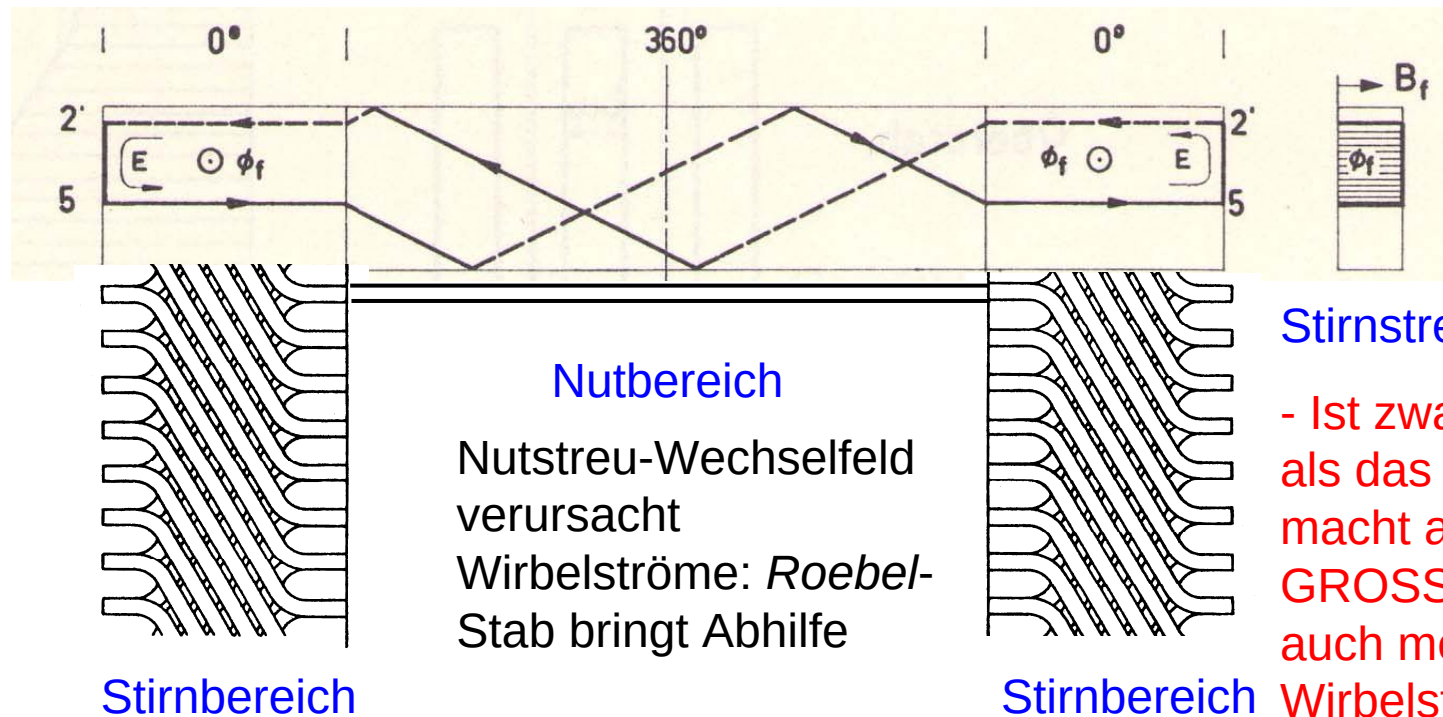


Bei Großgeneratoren kommt dem Stirnstreu- Wechselfeld große Bedeutung zu

Quelle:
BBC (heute
Alstom Power),
Birr, Schweiz

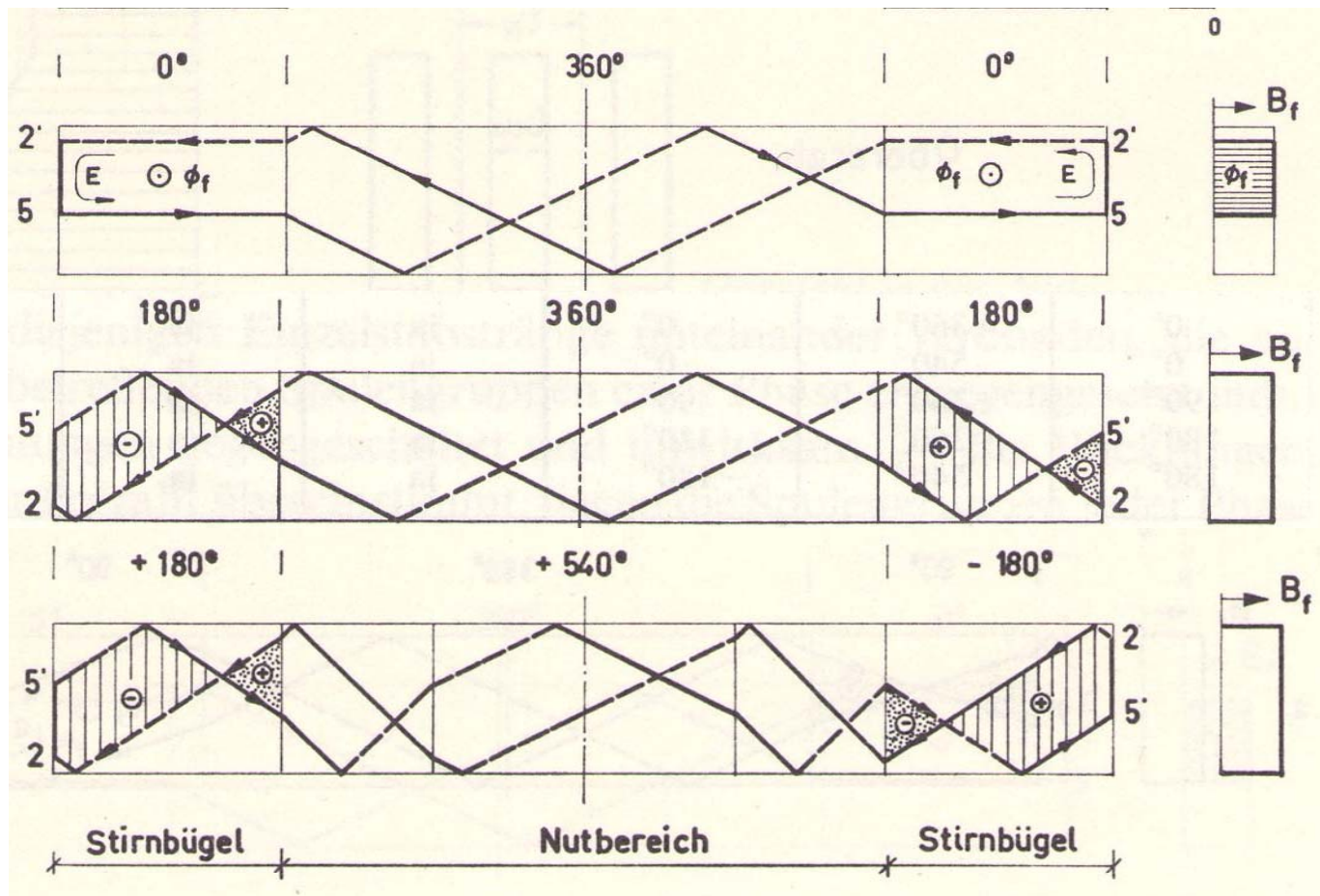


Die Drehstromwicklung, bestehend aus *Roebel-* *Stäben*, muss weiterentwickelt werden



- Ist zwar deutlich kleiner als das Nutstreufeld, macht aber in GROSSEN Generatoren auch merkbare Wirbelstromverluste in den Stirnverbinder-Leitern!

Weiterentwicklung der *Roebel*-Stäbe: Verdrillung auch im Stirnbereich



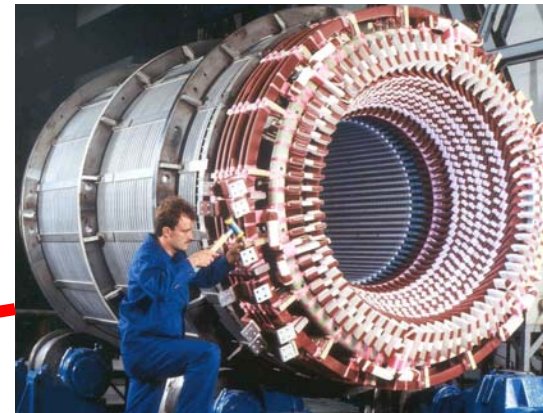
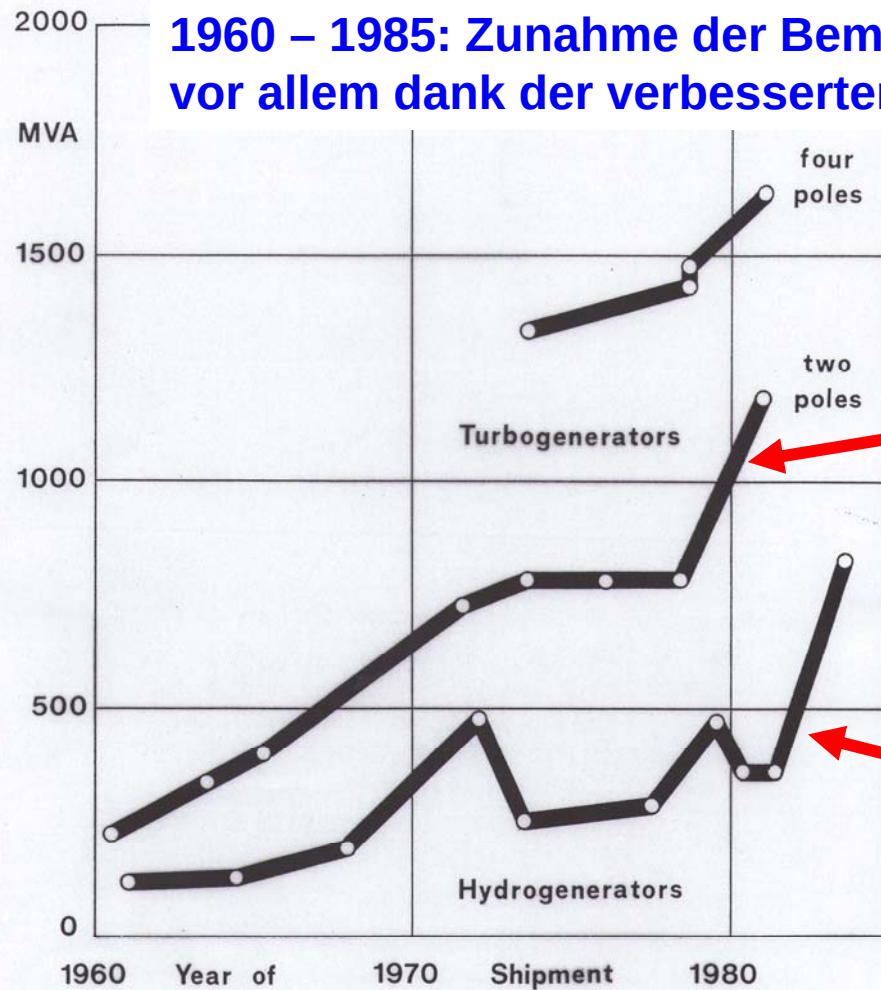
Patent *L. Roebel*,
1912

Patent *F. Müllner*,
1961

Patent ca. 1970:
**Höchst möglicher
Ausgleich aller
Streifeldkomponenten
durch Verdrillung**

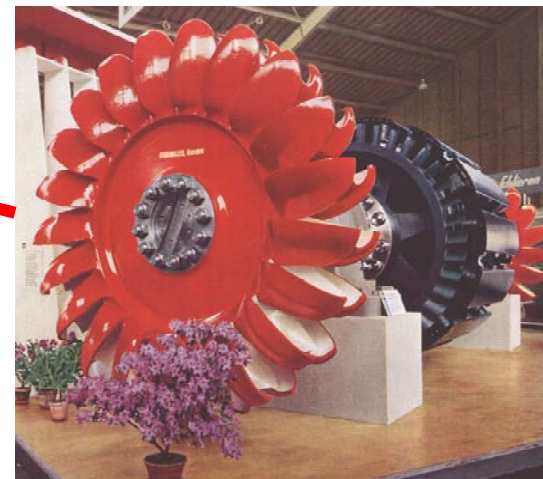
„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer

1960 – 1985: Zunahme der Bemessungsleistung je Synchron-Generator vor allem dank der verbesserten Kühlung



Zweipoliger
luftgekühlter
Turbogenerator-
Ständer

Quelle:
BBC (heute
Alstom Power),
Birr, Schweiz



Zwölfpoliger
luftgekühlter
Schenkelpol-
Läufer mit zwei
Pelton-
Turbinenräder

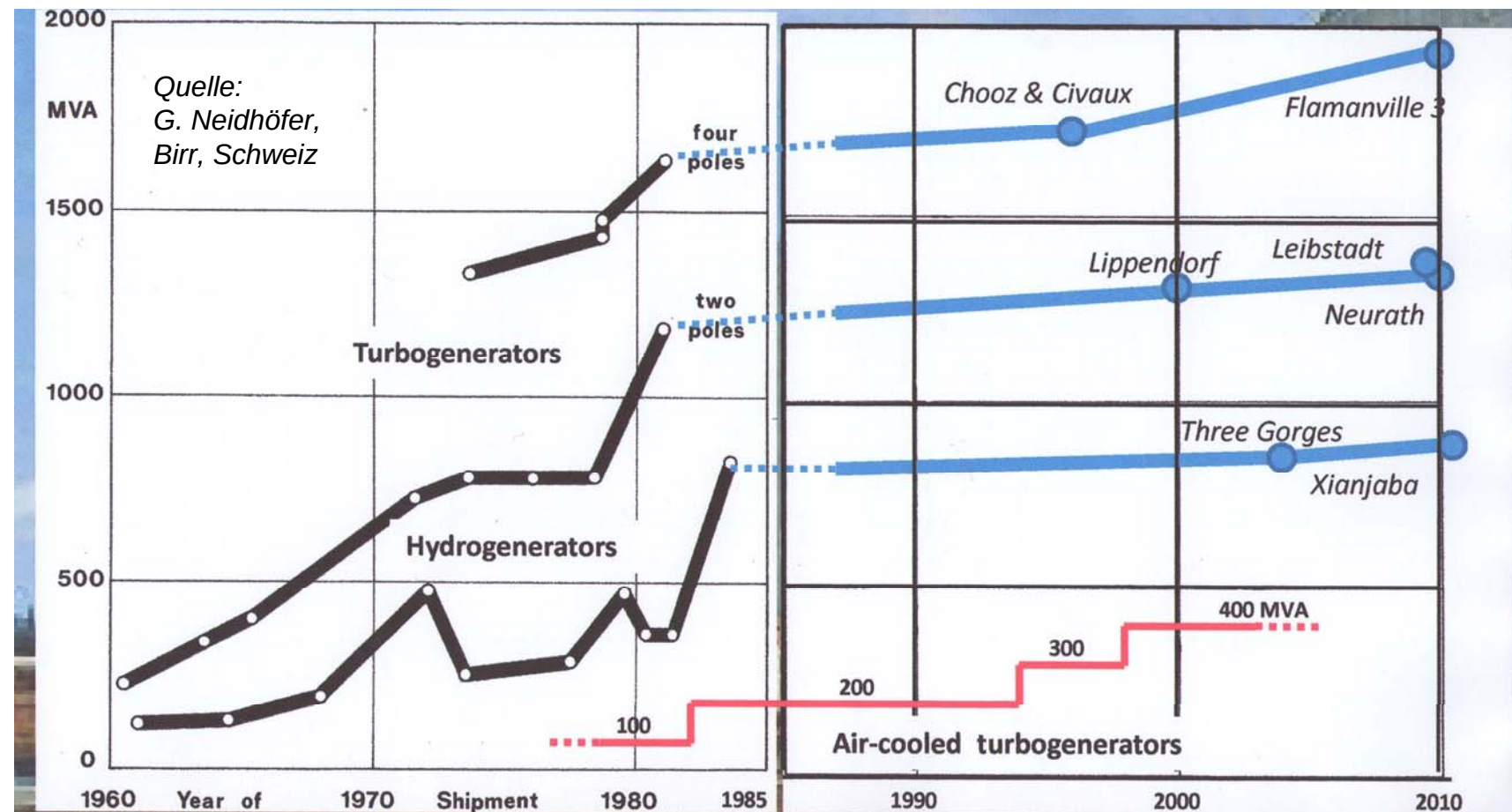
Quelle:
G. Neidhöfer,
Birr, Schweiz



„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer

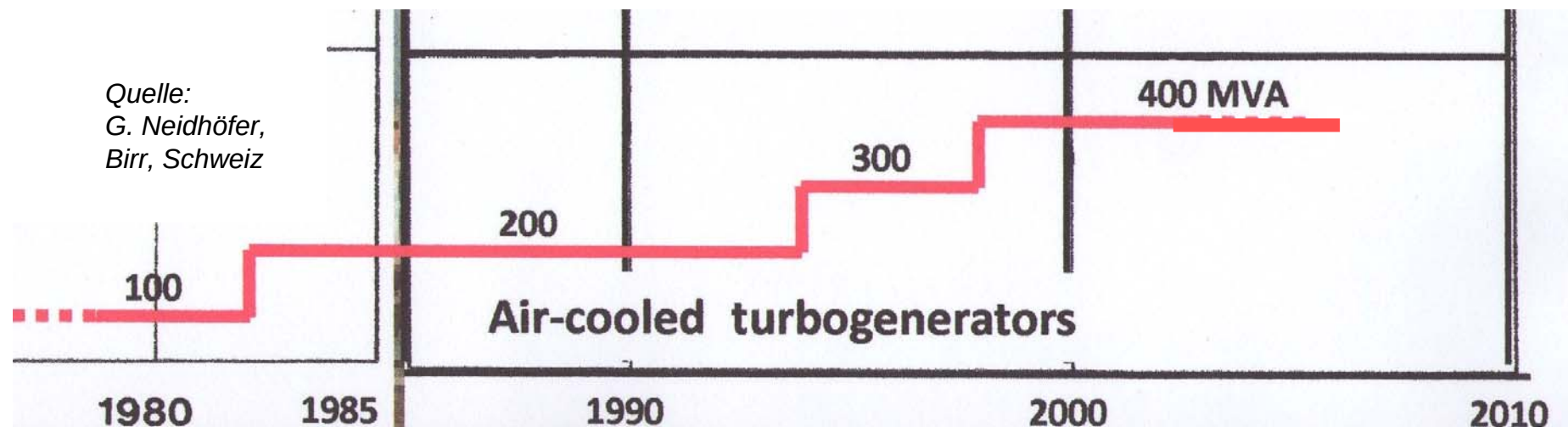
1960 – 2010: Größte Leistungen

2000 MVA bei Turbogeneratoren - 850 MVA bei Wasserkraftgeneratoren

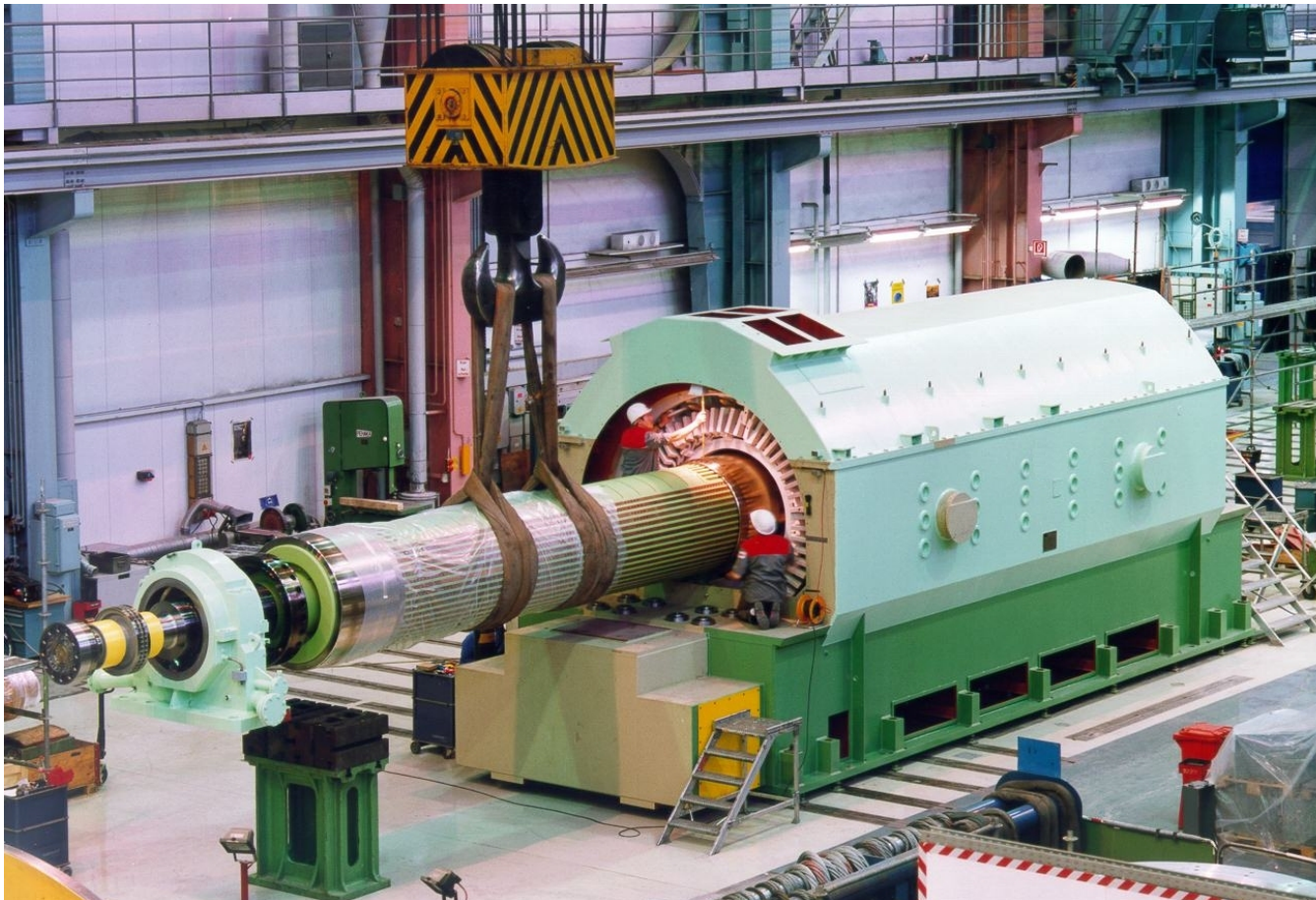


Steigerung der Bemessungsleistung bei luftgekühlten zweipoligen Turbogeneratoren

- Leistungsklasse passend zu den verfügbaren Gasturbinen
- Einfaches, robustes Kühlverfahren
- Steigerung des Kühlvermögens dank Kammerkühlverfahren



„Highlights“ im Werdegang von Gerhard Neidhöfer



Luftgekühlter zweipoliger Turbogenerator

400 MVA

3000/min

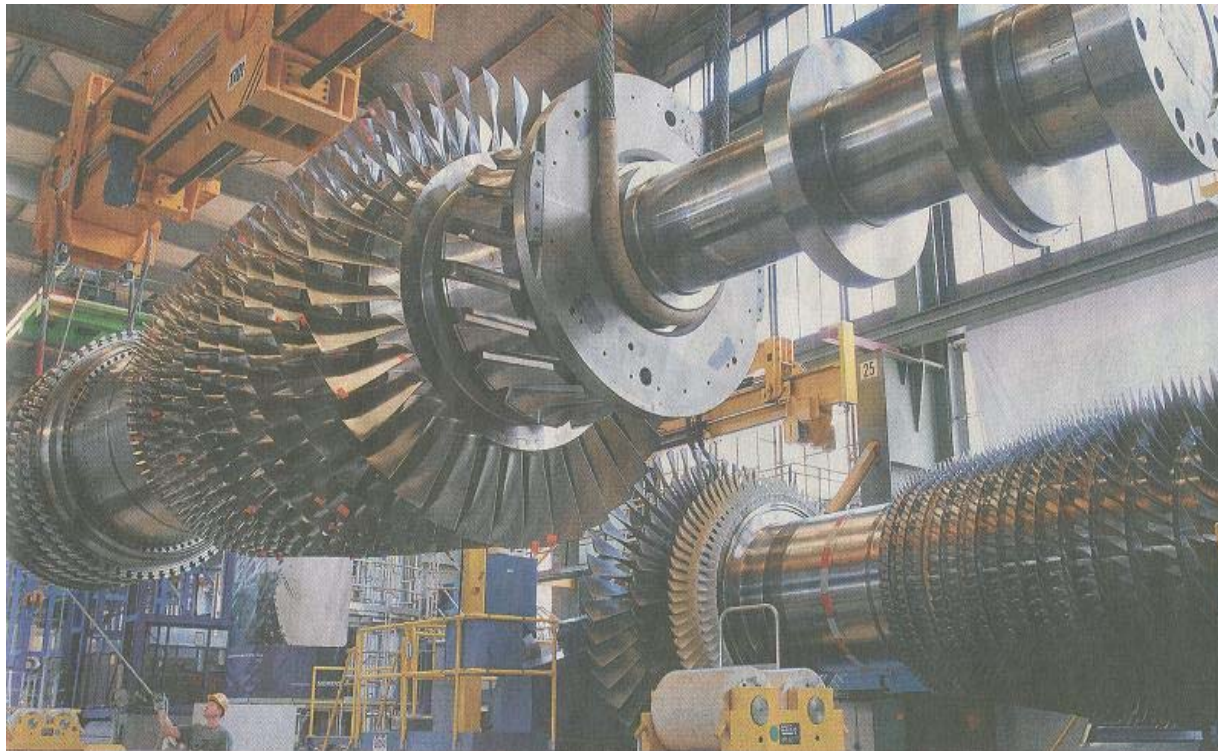
50 Hz

Quelle:
ABB (jetzt
Alstom Power) ,
Birr, Schweiz



Einsatz luftgekühlter Turbogeneratoren gemeinsam mit Gasturbinen

Rotor der weltgrößten Gasturbine 340 MW (Kraftwerk *Irsching*, *Bayern*)



2011:

Einsatz im kombinierten
Gas- und Dampfprozess mit
einer nachgeschalteten
Dampfturbine

Summenleistung: 530 MW

Summenwirkungsgrad: 60%
(Weltspitze!)

Quelle: Siemens AG, Deutschland



Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze

Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze



1985 ITAIPU

**Einfahren eines
Schenkelpol-Läufers in
den Stator eines der 18
(nun 20) Wasserkraft-
generatoren in
Vertikalbauweise**

824 MVA

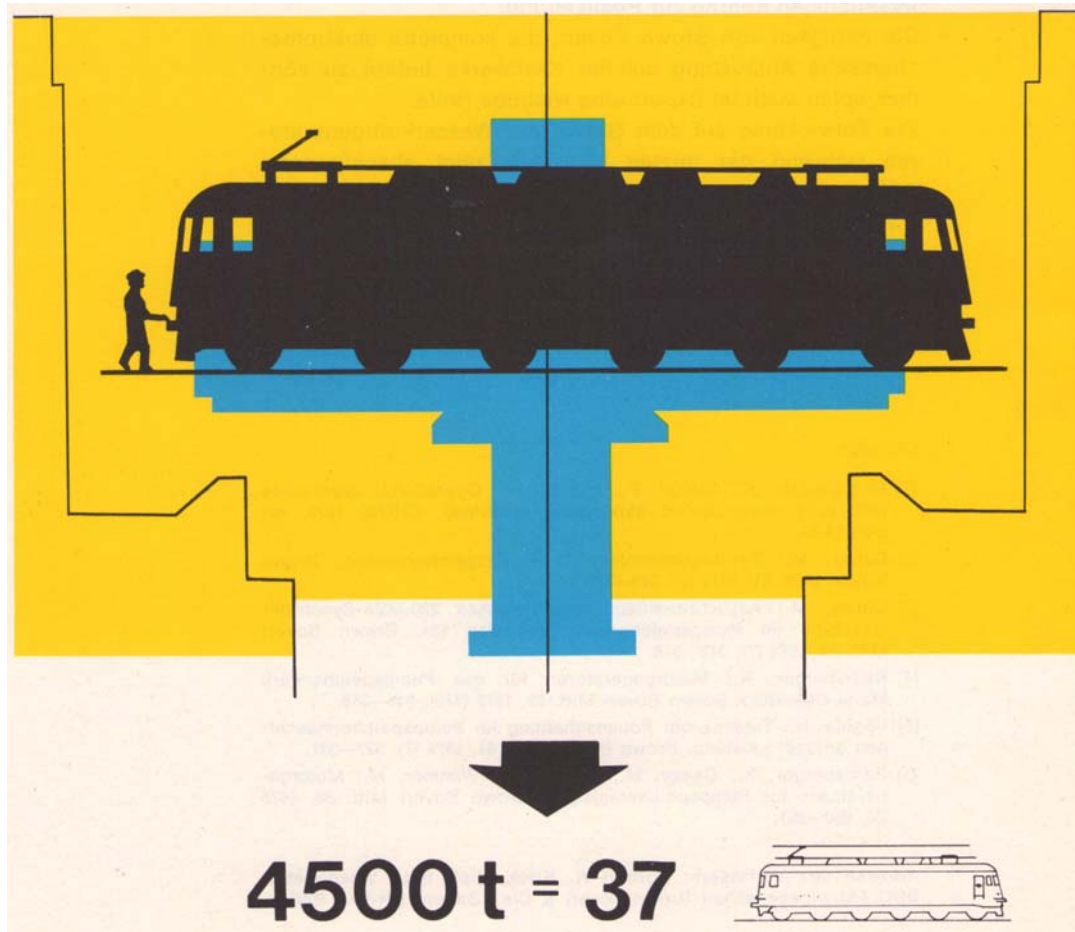
90.0/min, 66-polig

50 Hz

Quelle:
BBC (jetzt Alstom Power)
Birr, Schweiz



Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze



1985 ITAIPU

Die Masse eines
Schenkelpol-Läufers von
4500 Tonnen erfordert
spezielle Trag- und
Führungslager

Quelle:
BBC (jetzt Alstom Power)
Birr, Schweiz



Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze

Wasserkraftwerk *Itaipu* am *Parana*-Fluss, 14 Milliarden Watt (14 GW)



Je 9 (nun 10)
Generatoren in
Brasilien und
Paraguay

Lange Zeit welt-
größtes Wasser-
kraftwerk

Links:
Wehre und Überlauf

Rechts:
Generatorstation

Quelle: Wikipedia



2008: Weltgrößter (vierpoliger) Turbogenerator 2000 MW

- Kernkraftwerk *Olkiluoto 3*, Finnland, 2 GW, 1500/min, 50 Hz
- Generator mit Wasserkühlung (Stator), Wasserstoffgaskühlung (Rotor)
- Rechts: Bürstenlose Erregermaschine, Generator bei der Typprüfung



Quelle:

Siemens AG,
Mülheim,
Deutschland



Kraftwerksgeneratoren der Weltspitze



„Hochzeit“: Einfahren des Läufers in die Statorbohrung

- Vierpoliger Turbo-
generator für ca.
2000 MVA, 50 Hz,
1500/min

Quelle: Alstom Power, Birr, Schweiz



Drei-Schluchten-Wasserkraftwerk am Yangtsekiang, China



Vertikale Schenkelpol-
Synchrongeneratoren

840 MVA, 700 MW, 50
HZ, 80-polig

26 Generatoren:
18.2 GW

z. Zt. weltgrößtes
Wasserkraftwerk

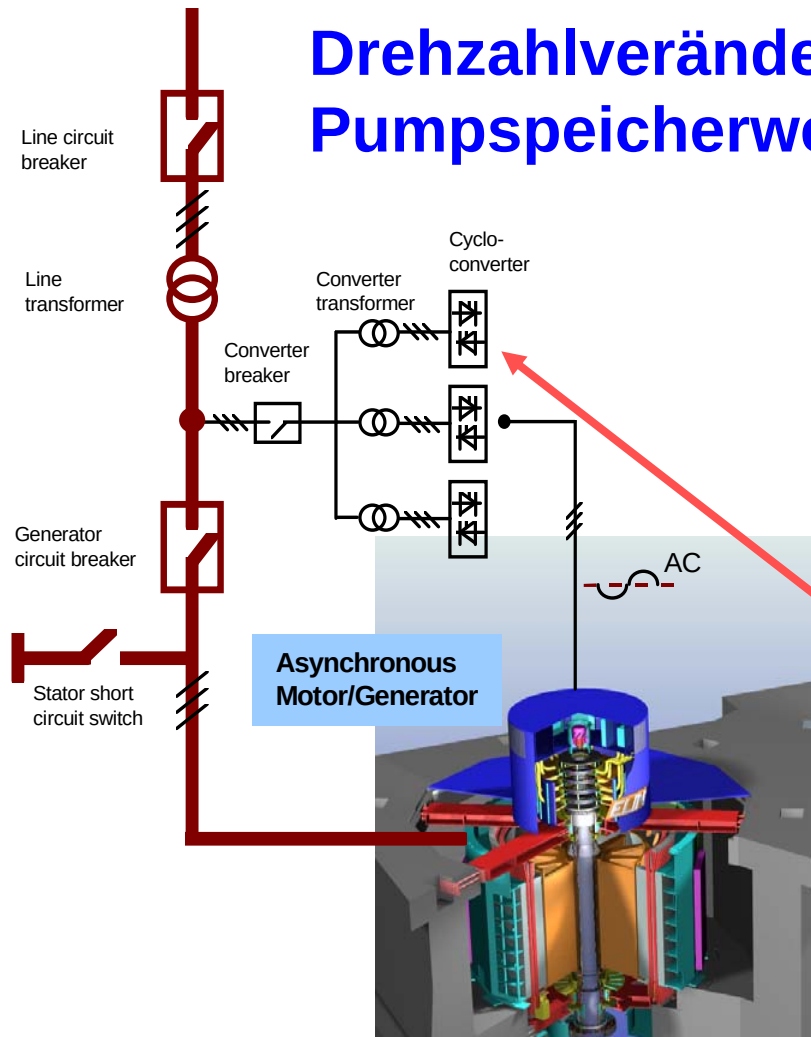
Quelle: Alstom Power, Birr, Schweiz



Einige Entwicklungstrends

Einige Entwicklungstrends

Drehzahlveränderbare Motor-Generatoren für Pumpspeicherwerke



Beispiel: Goldisthal, Deutschland

Doppelt gespeiste Asynchron-Motor-Generatoren:

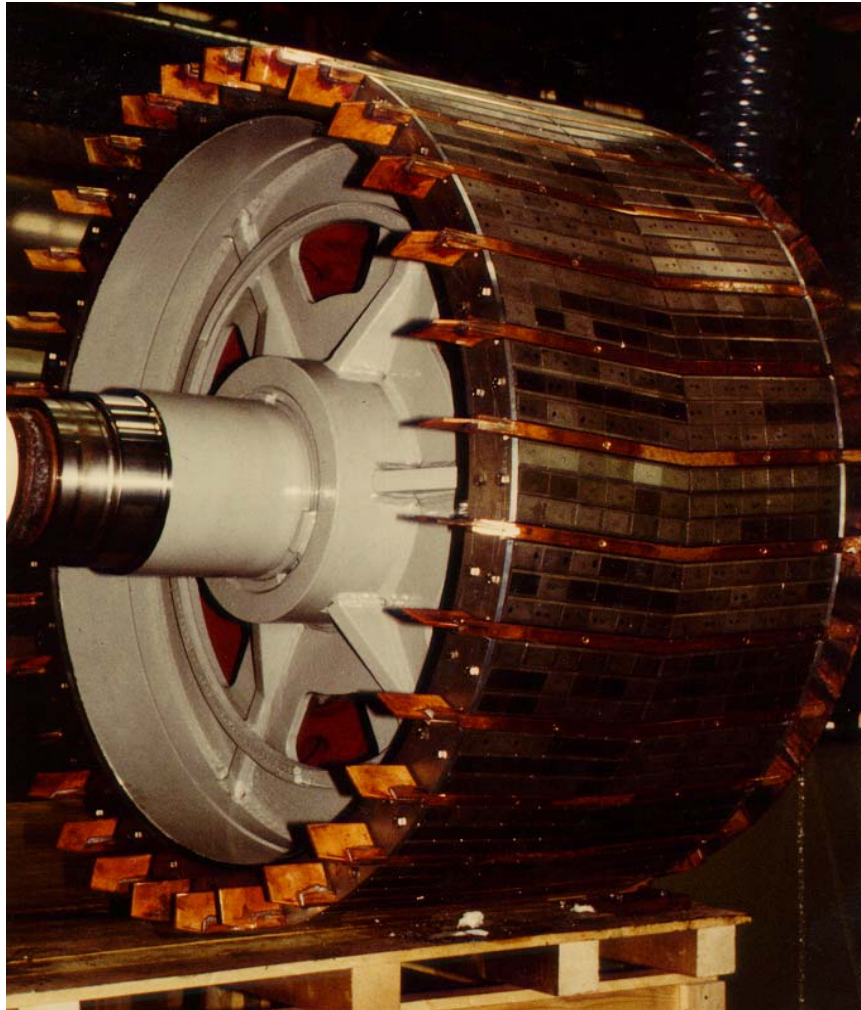
340 MVA, 300 ... 346/min, 18-polig, 50 Hz

Ein **Thyristor-Direktumrichter** speist die Rotorwicklung mit 0 ... 5 Hz & ca. 35 MVA Leistung

Vorteil: Wesentlich bessere Speichermöglichkeit elektrischer Energie!

Quelle: VA Tech Hydro (jetzt Andritz Hydro), Österreich

Einige Entwicklungstrends



Einsatz von Hochenergie-Dauermagneten (NdFeB) auch bei drehzahlveränderbaren Antrieben im MW-Bereich

Prototyp eines 32-poligen Dauermagnetläufers für einen Synchronmotor als Schiffsantrieb

Quelle: Siemens AG, Nürnberg, Deutschland



Einige Entwicklungstrends

Einsatz der Hochtemperatur-Supraleiter als Läuferwicklung für große Synchrongeneratoren



Prototypentest

2-poliger Synchrongenerator
für Schiffsbordnetze

4 MW, 3600/min, 60 Hz

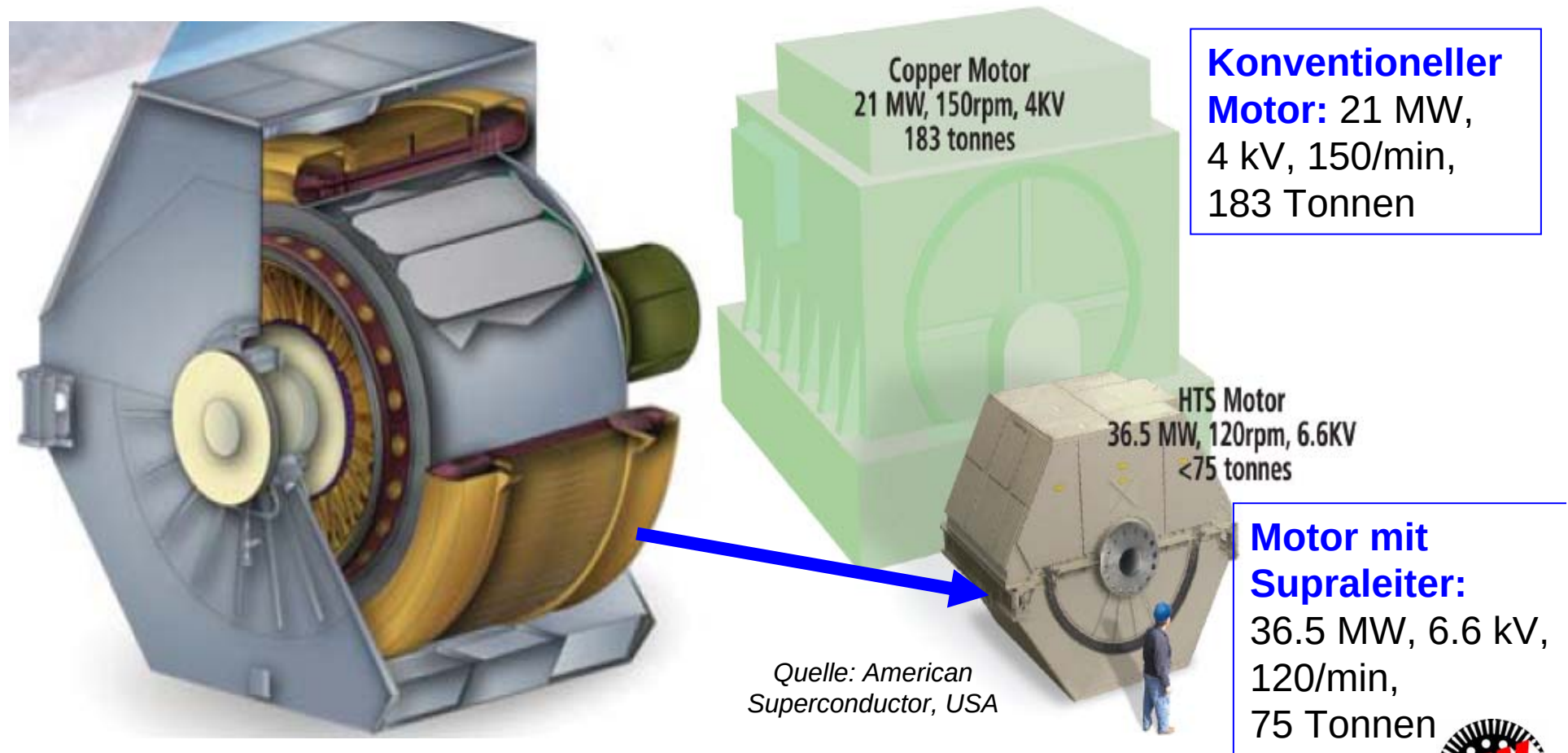
HTSL-Läuferwicklung
betrieben bei ca. -245°C

Gesamt-Wirkungsgrad samt
Kältetechnik: ca. 98.5%

*Quelle: Siemens AG,
Nürnberg, Deutschland*



Größenvergleich: Synchronmotor als Schiffsantrieb



Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Moderne elektrische Maschinen **skalieren in einem weiten Leistungsbereich** von ca. 1 W bis 2000 MW über 9 Zehnerpotenzen!
- Der von **M. v. Dolivo-Dobrowolsky** erfundene Käfigläufer-Asynchronmotor deckt heute etwa **90% aller Motoranwendungen** im industriellen und gewerblichen Bereich weltweit ab, und sind bis zu höchsten Wirkungsgraden $> 97\%$ entwickelt worden.
- Als **Großmaschinen dominieren Synchrongeneratoren** in der Energieerzeugung bis ca. 2 GW/Maschine. An ihrer Weiterentwicklung hatte **G. Neidhöfer** bei *BBC/ABB*/heute *Alstom* namhaften Anteil!
- Der gigantische Energiehunger der mittlerweile 7 Milliarden Menschen weltweit erfordert **weitere Verbesserungen und Weiterentwicklungen!**

80. Geburtstag Prof. Neidhöfer – Entwicklungs- Highlights bei E-Maschinen 1970-2010



Danke für ihre Aufmerksamkeit !

