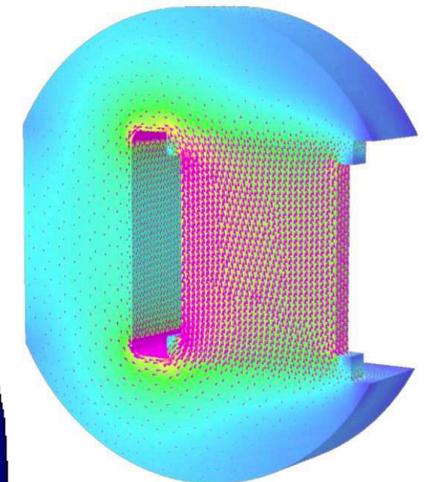
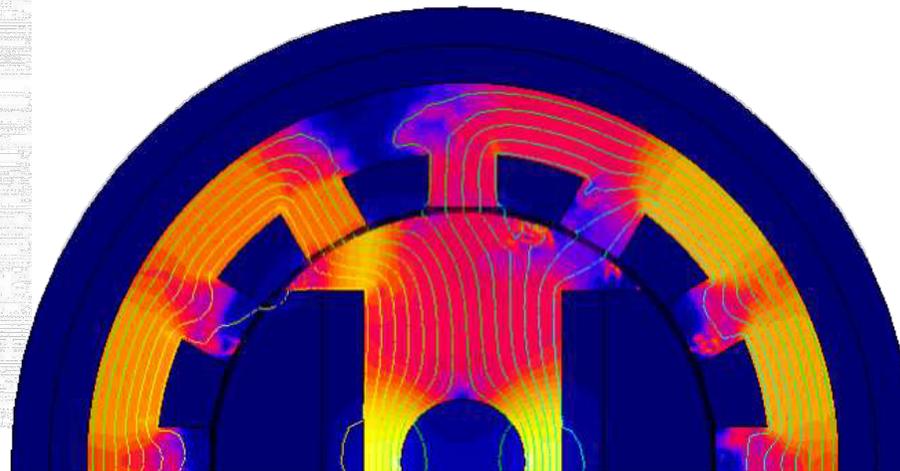
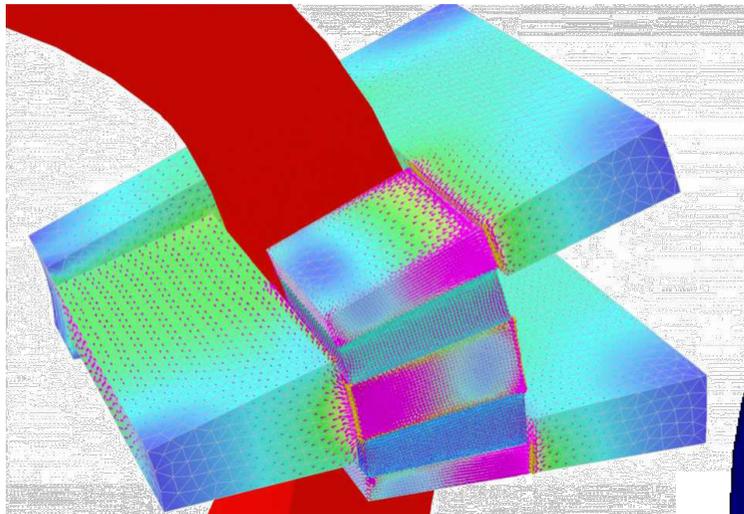


Vorlesung

Elektrische und magnetische Felder (EMF)

SS 2019

Elektrotechnisches Institut (ETI)



1. Organisatorisches

1.1 Vorlesung

1.2 Übung

1.3 Tutorien

1.4 Prüfung

2. Elektrotechnisches Institut – Hybridelektrische Fahrzeuge

2.1 Arbeitsgebiete

2.2 Forschungsprojekte

2.3 Standorte

3. Einleitung

4. Inhaltsverzeichnis

5. Literaturempfehlungen

1.1 Vorlesung

- **Vorlesung:** Freitags, 11:30 – 13:00 Uhr, Fasanengarten.
Termine: <http://www.eti.kit.edu> → Studium und Lehre → „Elektromagnetische Felder“
Sondertermine beachten !!!
- **Vorlesungsunterlagen:** Foliensatz wird als PDF auf Vorlesungshomepage passwortgeschützt zum Download bereitgestellt.
Benutzername: EMF **Passwort:** skalarfeld
- **Sprechstunde:** Nur nach Vereinbarung (telefonisch über Fr. Keilbach, bitte keine E-Mail!)
- **Voraussetzungen:** Differenzial und Integralrechnung, Grundlagen Elektrotechnik



Prof. Dr.-Ing.
Martin Doppelbauer

*Professur für
Hybridelektrische Fahrzeuge*

Tel.: +49 (721) 608-46250
Martin.Doppelbauer@kit.edu
Campus Süd, Geb. 11.10
Raum 114



**Marie-Louise
Keilbach**

Sekretariat / Assistenz

Tel.: +49 (721) 608-42473
Marie-Louise.Keilbach@kit.edu
Campus Süd, Geb. 11.10
Raum 113

1.2 Übung

- **Übung:** Zweiwöchig dienstags, 15:45 – 17:15 Uhr, Fasanengarten. Genaue Termine: <http://www.eti.kit.edu> → Studium und Lehre → „Übung Elektromagnetische Felder“
Sondertermine beachten !!!
- **Übungsblätter:** Vor der Übung per Download auf Übungshomepage bereitgestellt. Das erforderliche Passwort wird in der Vorlesung bekannt gegeben.
- **Kurzlösungen:** Nach der Übung per Download auf der Übungshomepage bereitgestellt
- **Übungsleiter:**



M. Sc.

Simon Foitzik

*Antriebe für
Elektrisches Fliegen*

Tel.: +49 (721) 608-48239

Simon.Foitzik@kit.edu

Campus Süd, Geb. 11.10

Raum 203

1.3 Tutorien

Tutorien zur Vorlesung EMF

- **Organisation:** Eduard Specht, Elektrotechnisches Institut ETI, eduard.specht@kit.edu
- **Fachkundige Hilfe** durch Tutoren
- **Ausgedruckte Aufgaben und Formelsammlung** mitbringen
- **Beginn: 06.05.2019**
- **Insgesamt 10 Termine** (siehe Homepage www.eti.kit.edu -> Studium und Lehre -> EMF)

1.3 Tutorien

15 parallele Gruppen:

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
08	#10253 Gruppe 1	#10256 Gruppe 4 #10261 Gruppe 3	#10262 Gruppe 8		#10266 Gruppe 11
09					
10					#10267 Gruppe 1 #10268 Gruppe 13
11					
12		#10257 Gruppe 5			
13					
14	#10254 Gruppe 2	#10258 Gruppe 6 #10259 Gruppe 7	#10255 Gruppe 9		#10269 Gruppe 14
15					
16			#10263 Gruppe 10		#10270 Gruppe 15
17					

Tutorien zur Vorlesung EMF

- Anmeldung: <http://go.wiwi.kit.edu/EMF19>
- Anmeldebeginn: **23.04.2019 um 17:15 Uhr**
- Anmeldeschluss: **26.04.2019 um 14:00 Uhr**
- Bekanntgabe der Gruppeneinteilung spätestens **am 30.04.2019 über EMF-Homepage und per E-Mail**

1.3 Tutorien

Beispiel Anmeldefenster

Termine

Bitte bewerten Sie die folgenden Termine mit 1 (niedrigste Wertung) bis 5 (höchste Wertung) Sternen.

✘ Es muss für alle Termine eine Bewertung abgegeben werden.

Bezeichnung / Person	Zeitpunkt / Ort	Bewertung (Ø 0.0)
Montag 8:00 Uhr (ITE)	Mo. 08:00-09:30 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Montag 11:30 Uhr (ITE)	Mo. 11:30-13:00 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Montag 11:30 Uhr (IBT)	Mo. 11:30-13:00 Seminarraum IBT	☆☆☆☆☆
Montag 15:45 Uhr (ITE)	Mo. 15:45-17:15 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Dienstag 9:45 Uhr (ITE)	Di. 09:45-11:15 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Dienstag 9:45 Uhr (IBT)	Di. 09:45-11:15 Seminarraum IBT	☆☆☆☆☆
Dienstag 14:00 Uhr (ITE)	Di. 14:00-15:30 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Dienstag 15:45 Uhr (ITE)	Di. 15:45-17:15 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆
Mittwoch 11:30 Uhr (ITE)	Mi. 11:30-13:00 Seminarraum ITE	☆☆☆☆☆

Elektrotechniker (6 ECTS)

- **Bachelor:** Die Vorlesung gehört zum Fach „Elektrotechnik“ im Pflichtbereich des Bachelor-Studiengangs
- **Master:** Die Vorlesung kann nicht angerechnet werden.

Mechatroniker (6 ECTS)

- **Bachelor** Die Vorlesung gehört zum Fach „Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen“ im Pflichtbereich des Bachelor-Studiengangs
- **Master:** Die Vorlesung kann nicht angerechnet werden.

Anmeldung zur Prüfung

- Anmeldeschluss ist Mitte Juni 2019.
- Online Anmeldung über das Studierendenportal (<https://studium.kit.edu/>).

1.4 Prüfung – Orientierungsprüfung

Elektrotechniker Bachelor (6 ECTS)

Das Modul ist eine Orientierungsprüfung, das bedeutet:

- Die Prüfung muss nach dem 2. Semester abgelegt werden (Anmeldung und Durchführung der Prüfung)
- Im Falle des Nicht-Bestehens kann die Prüfung einmal wiederholt werden und zwar nach dem 3. Semester, nicht später!
- Wer eine qualifizierte Teilnahme am MINT-Kolleg im Umfang von einem / zwei Semester(n) nachweisen kann, bei dem verschieben sich die Fristen um ein / zwei Semester.
- Im Falle von Krankheit oder sonstigen schwerwiegenden Gründen können diese Fristen im Einzelfall auf Antrag verlängert werden. Bitte wenden Sie sich umgehend an den Prüfungsausschuss.

Details siehe §8 der Bachelor Prüfungsordnung SPO 2018

1.4 Prüfung

Schriftlich am **30.08.2019 von 8:00 Uhr bis 10:00 Uhr** (2 Stunden)

Gebäude (Hörsaal): 10.21 (Carl-Benz), 10.21 (Gottlieb-Daimler), 30.21 (Gerthsen), 30.95 (Audimax)

Die Gruppeneinteilung wird morgens am Tag der Klausur ausgehängt. Bitte früh da sein!

Aufbau:

- 6 Aufgaben mit ähnlichem Umfang und Schwierigkeitsgrad, jeweils 20 Minuten mittlere Bearbeitungszeit
- Alle Kapitel der Vorlesung und alle Übungen sind prüfungsrelevant

Mitbringen:

- Studenten mit Online-Anmeldung: Der **Studentenausweis** ist mitzubringen.
- Studenten ohne Online-Anmeldung: **Studentenausweis und Immatrikulationsbescheinigung** ist mitzubringen.

Hilfsmittel:

- 1 handschriftlich beschriebenes DIN A4 Blatt (Vorder- und Rückseite)
- Nicht-programmierbarer, nicht-grafikfähiger Taschenrechner
- Lineal und Geodreieck
- Formelsammlung
- Weitere Hilfsmittel (Folienskript, Übungsblätter, ...) sind **nicht** zugelassen.

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun



Professur Elektrische
Antriebe und
Leistungselektronik (EAL)

Forschungsschwerpunkt
**Elektrische Antriebe und
Leistungselektronik**

Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer



Professur für Hybrid-
elektrische Fahrzeuge (HEV)

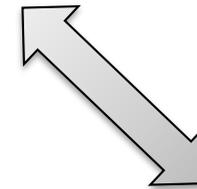
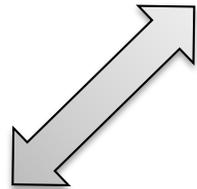
Forschungsschwerpunkt
**Elektromotoren
Antriebssysteme**

Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

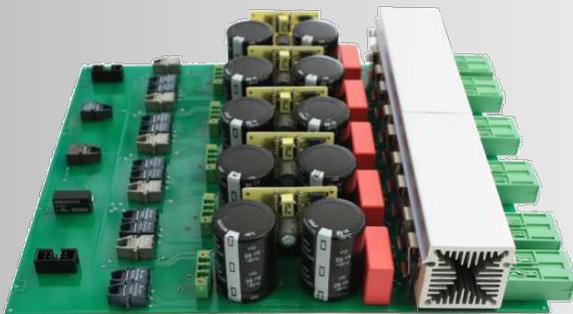


Professur für Leistungs-
elektronische Systeme (PES)

Forschungsschwerpunkt
**Leistungselektronik und
Simulation**

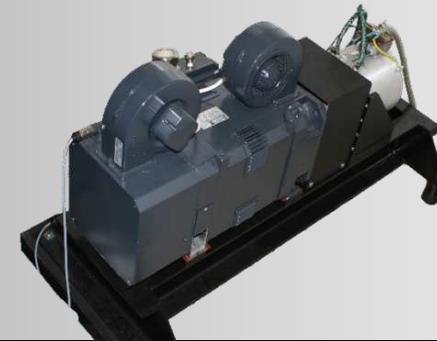


Leistungselektronik



- Neue Leistungsumrichtertopologien
- Modellbildung und optimierte Ansteuerung
- Charakterisierung und Erprobung neuer aktiver und passiver Bauelemente

Elektrische Antriebe

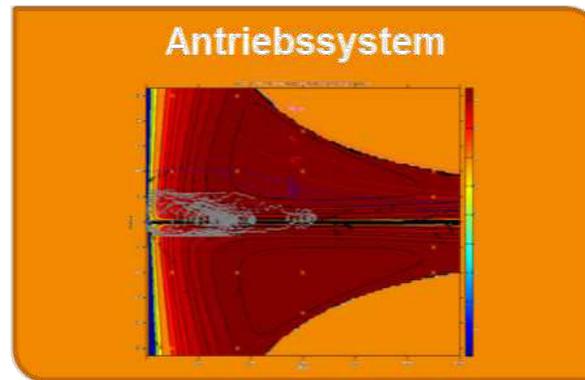
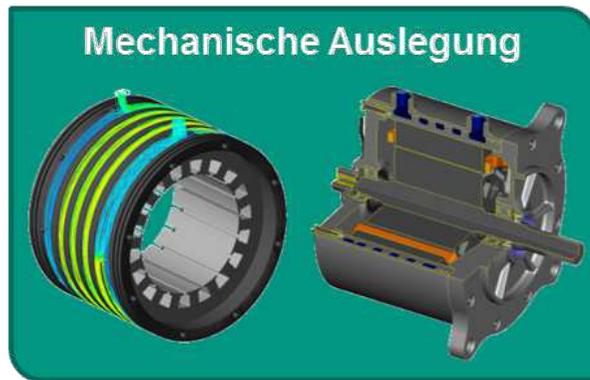
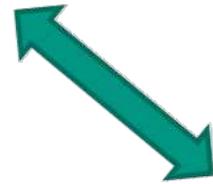


- Optimale Regelung von DC- und AC-Motoren
- Modellbildung
- Neue Antriebskonzepte
- Effiziente Antriebe

2.1 Arbeitsgebiete – Prof. Doppelbauer

HEV_o

Hybrid Electric Vehicles



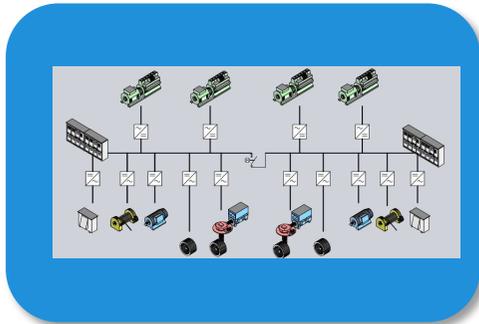
- Fertigungsoptimale Konstruktion
- Verbesserte Kühl- und Leichtbaukonzepte
- Einsatz neuartiger Materialien

- Konzeptanalyse und Bewertung
- Simulation Antriebsstrang
- Optimierung Motor und Elektronik speziell für den Fahrzeugeinsatz

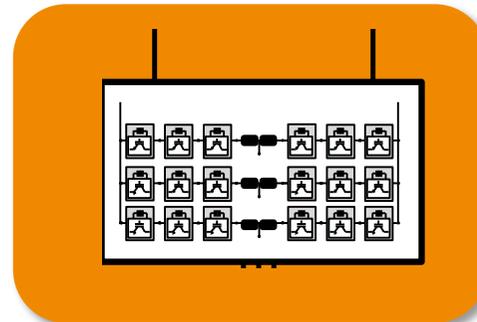
- Analytische und numerische Optimierung
- Innovative Maschinenkonzepte
- Regelstrategien

Leistungselektronik für Netze und Antriebe

von dem
System



über die
Komponenten



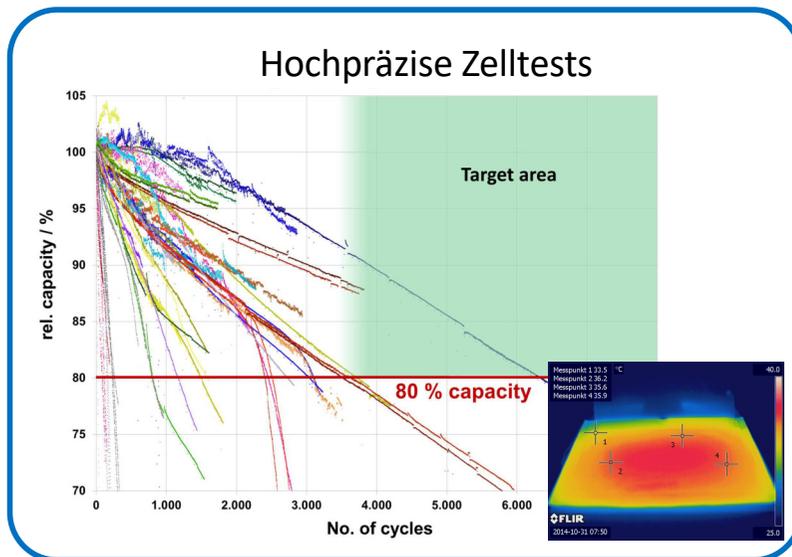
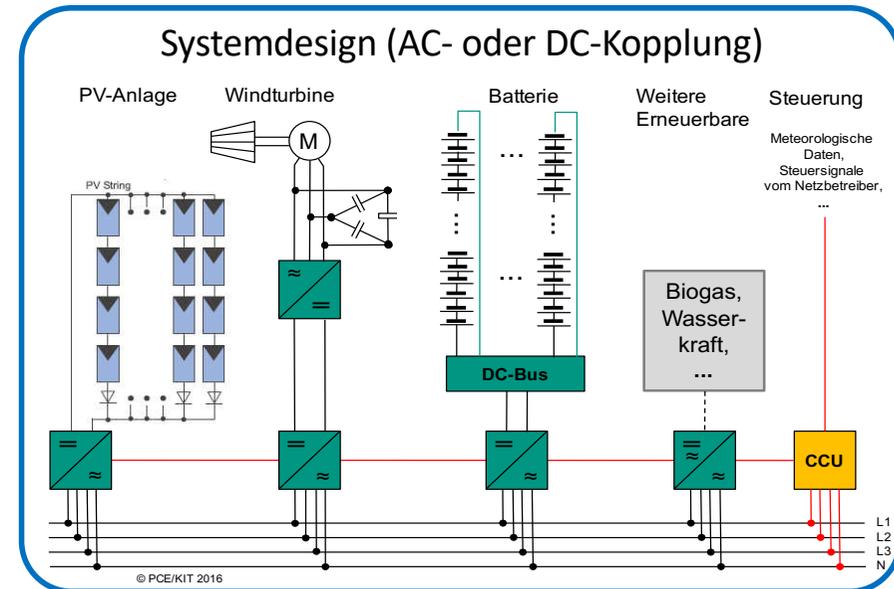
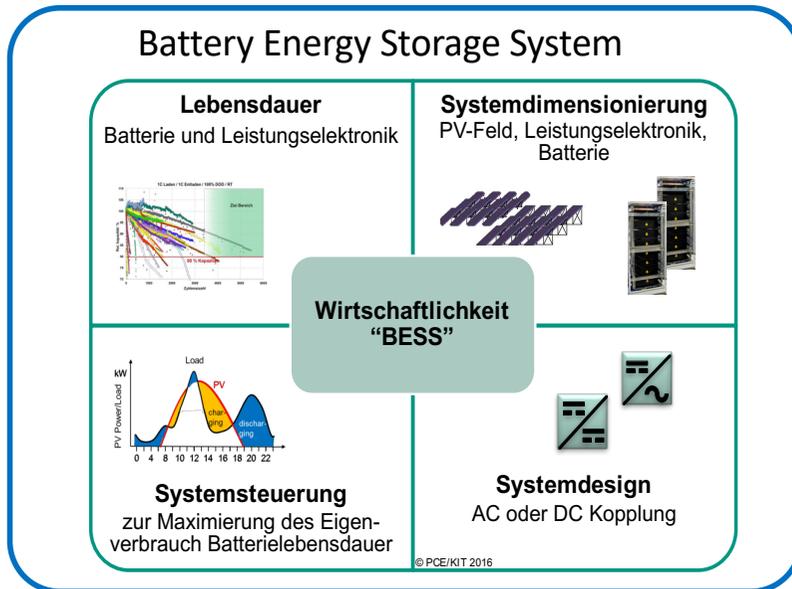
zu den
Bauteilen



Kompetenzen

- Umrichterauslegung/-berechnung
- Elektrische und Thermische Simulation
- Qualifikation LV/MV-Leistungshalbleiter
- Schaltungsentwicklung
(Leistungs-/Signalelektronik)
- Regelungsverfahren / Software
- Prototypen: Konstruktion, Bau, Prüfung
- Prüfstandsbaue

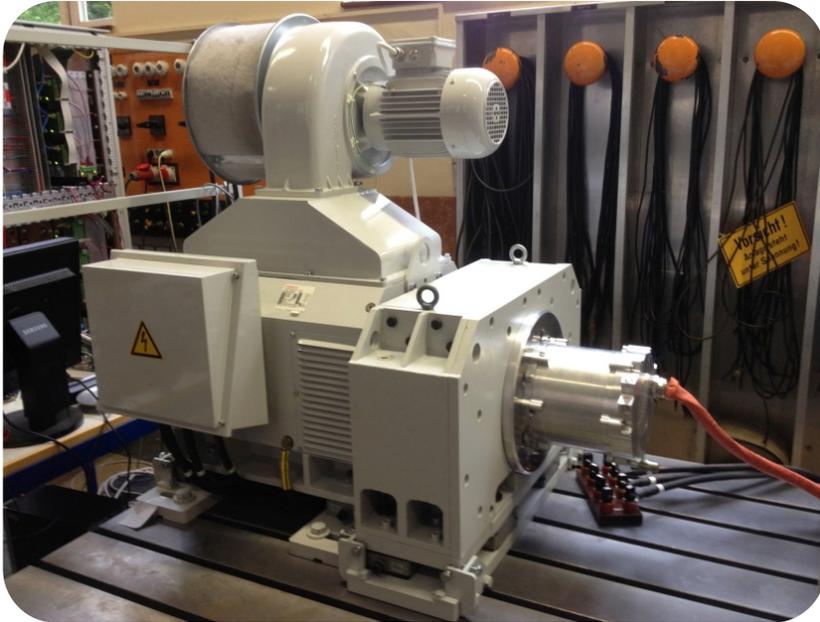
2.1 ETI Batterietechnik



2.2 Aktuelle Projektpartner



2.3 Forschungsprojekte – Messtechnische Charakterisierung und Prüfung



Bremsmotor (links) und Prüfling (rechts)



Umrichter mit vier Drehstrombrücken
und DSP-System



Prüffelder für Elektromotoren am Campus Ost

2.3 Forschungsprojekte – High Performance Motoren



S01-30-20

Max. Drehzahl	20.000 rpm
Dauerleistung	25 kW ¹
Spitzenleistung	70 kW ²
Gesamtgewicht	5,3 kg ⁴
Bester Wirkungsgrad	>95%



Maximale Spitzenleistung



S03-17-30

Max. Drehzahl	30.000 rpm
Dauerleistung	>30 kW ³
Spitzenleistung	50 kW
Gesamtgewicht	4,1 kg ⁴
Bester Wirkungsgrad	≈94%



Technologie

Nutfüllfaktor >80% (Verteilte Wicklung)



S02-90-15

Max. Drehzahl	15.000 rpm
Dauerleistung	60 kW
Spitzenleistung	70 kW
Gesamtgewicht	13 kg ⁴
Bester Wirkungsgrad	> 96%



Maximale Dauerleistung

Technologie

Direkte Nutkühlung (Wasser/Glykol)

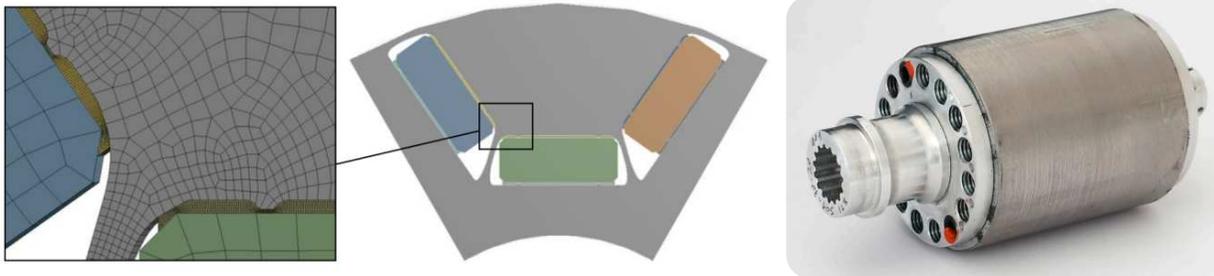
¹ Mit Rotorölkühlung aus dem Getriebe

² Für 6 sec, ausgehend von Raumtemperatur

³ Mit Ölkühlung, etwas niedriger bei der wassergekühlten Ausführung

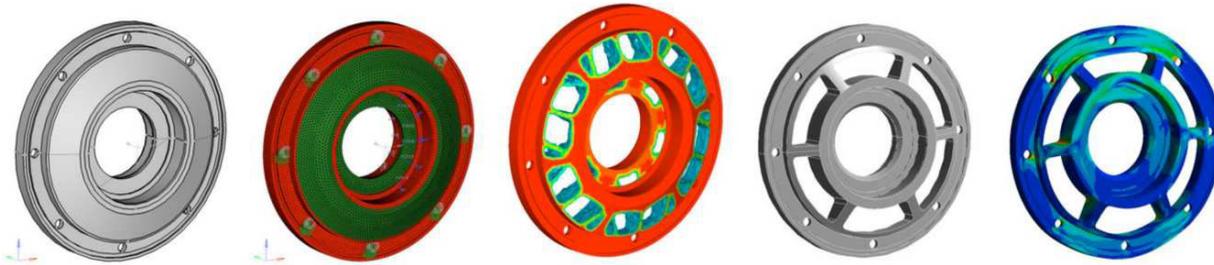
⁴ Vollständiger Motor mit Gehäuse, Flanschen, Stecker usw.

2.3 Forschungsprojekte – Mechanische Auslegung und Konstruktion von Elektromotoren



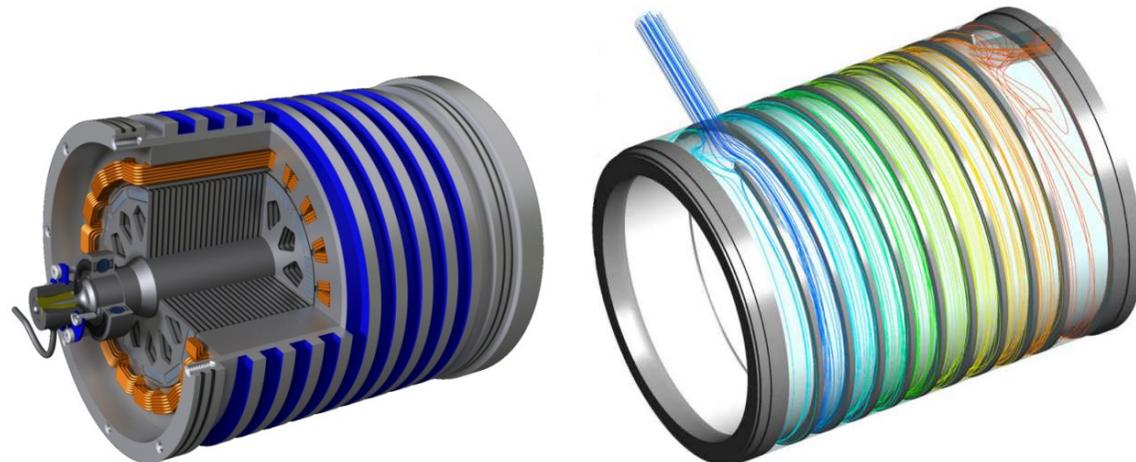
Mechanische Optimierung

- Leichtbau
- Rotordynamik
- Neue Fertigungsverfahren
- Hoher Füllfaktor



Kühlungskonzepte

- Konventionelle Topologien
- Direkte Stator Kühlung
(integriert ins Blechpaket)
- Direkte Wicklungskühlung



2.3 Forschungsprojekte – Beispielfahrzeuge

Projekt REM 2030



Audi A1 Sportsback

Umgebaut von Verbrenner auf Elektroauto
mit Li-Ionen Batterie und Brennstoffzelle

Formula Student KA-Racing



2014

■ Dritter Platz der Weltrangliste

2015

■ Zweiter Platz der Weltrangliste

2016

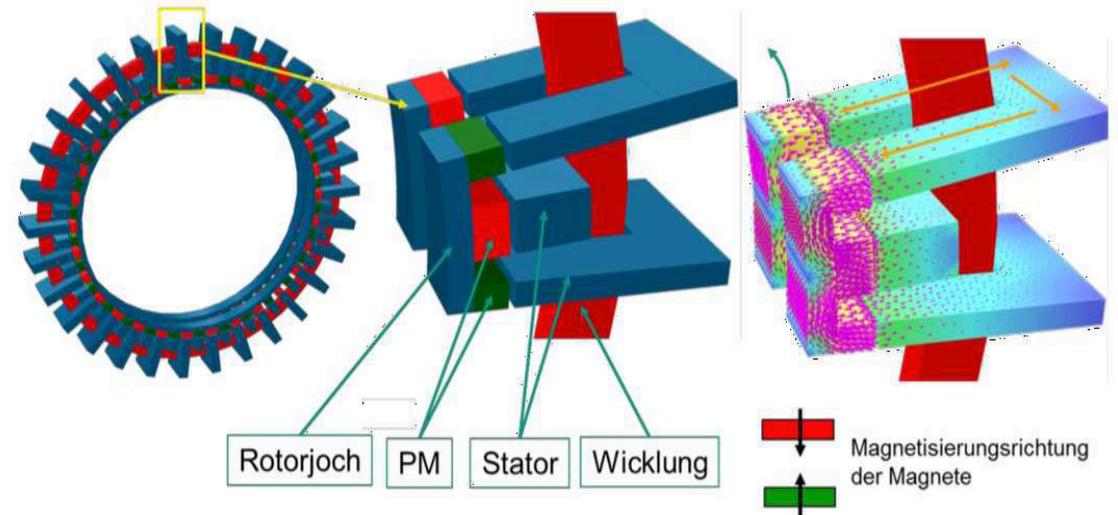
■ Erster Platz der Weltrangliste

2.3 Forschungsprojekte – Neuartige Motorentechnologien und Werkstoffe

Axialflussmotor



Transversalflussmotor



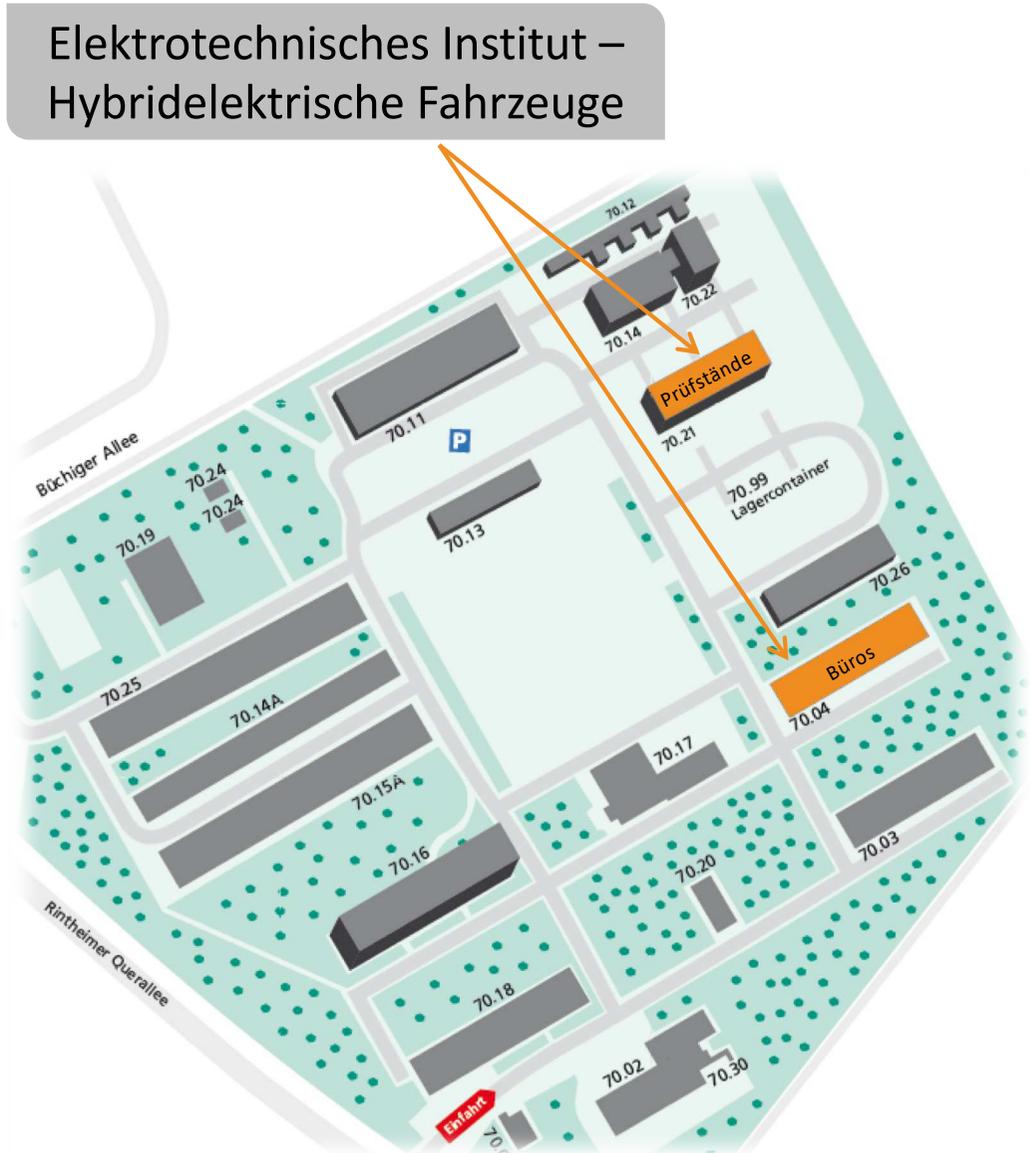
Parameter	Wert
Aktiver Außendurchmesser	301 mm
Aktiver Innendurchmesser	209 mm
Aktiver Axiallänge	79 mm
Luftspaltlänge	1 mm
Maximaler Phasenstrom	300 Arms
Maximale Leiterspannung	167 Vrms
Maximales Drehmoment	233 Nm
Maximale Drehzahl	4500 rpm
Maximale Leistung	67 kW
Maximaler Wirkungsgrad	92.6 %

2.4 Standorte

Campus Süd



Campus Ost



<https://www.eti.kit.edu>

2.4 Standorte

Campus Nord

Elektrotechnisches Institut –
Batterietechnikum
Solar-Versuchsfeld

Elektrotechnisches Institut –
Batterietechnikum



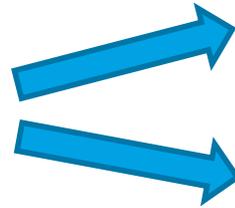
<http://www.competence-e.kit.edu>

3. Einleitung

Elektromagnetische Felder
(2. Semester)

Elektromagnetische Wellen
(3. Semester)

Theoretische Elektrotechnik



**Vorlesung (weitgehend)
identisch zur Vorlesung:**

Prof. Dr.-Ing. Gerd Trommer

Vorlesung *Felder und Wellen* bis WS 2018/19
KIT Karlsruhe

Inhaltliche Basis:

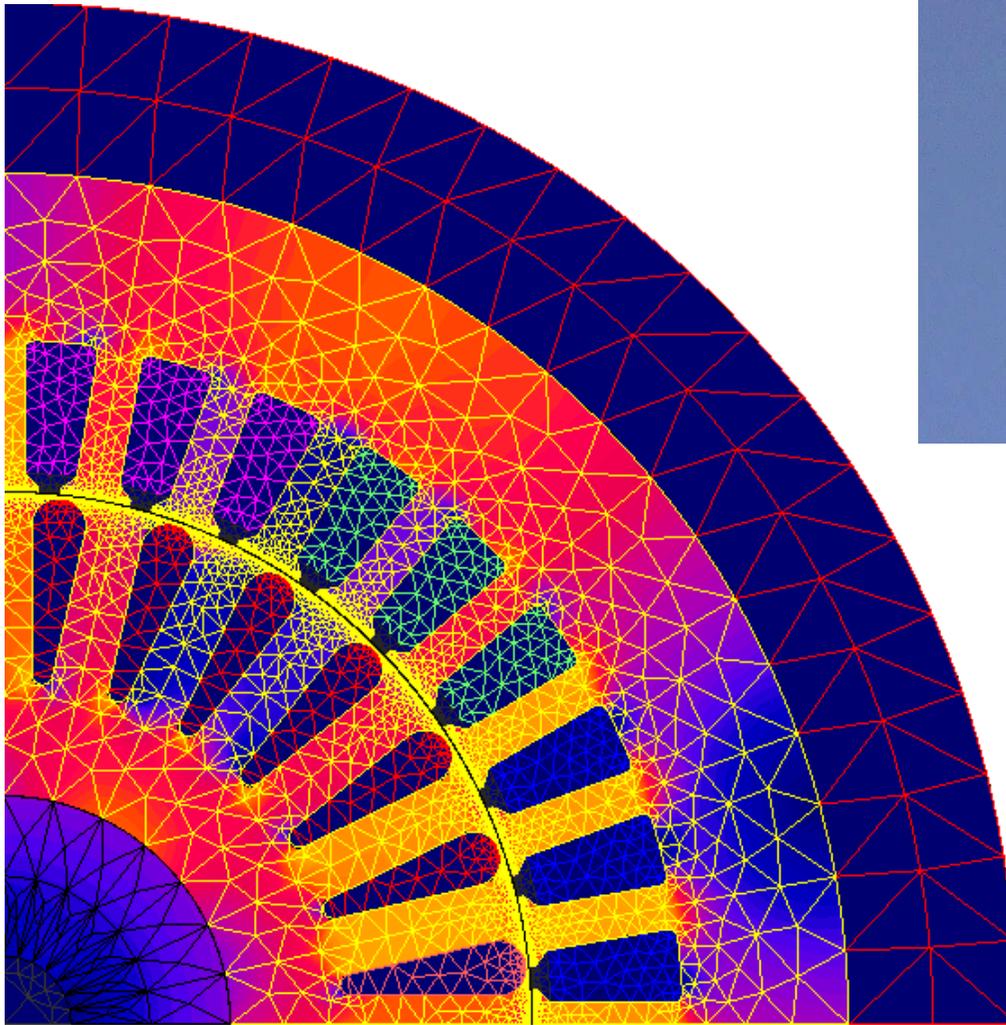
Prof. Dr.-Ing. Heino Henke

Professur für Theoretische Elektrotechnik, TU Berlin
Elektromagnetische Felder - Theorie und Anwendung
Springer Verlag

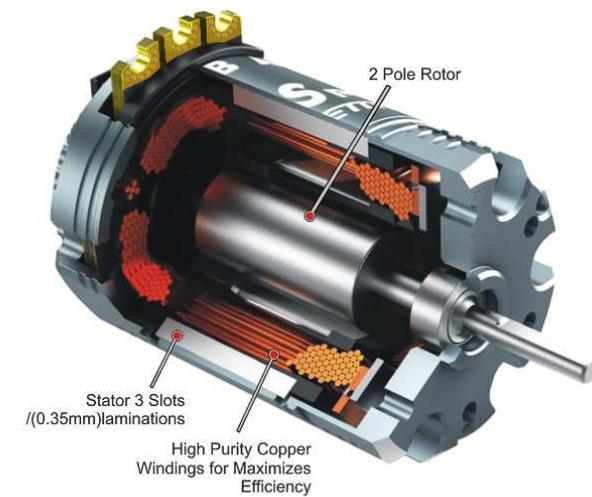
<https://www.springer.com/de/book/9783642197468>

3. Einleitung

Anwendung: Elektromotoren



Bildquelle: Schweighofer, ARES Elektromotor, Europapark Rust



Numerische Berechnung magnetischer Felder

3. Einleitung

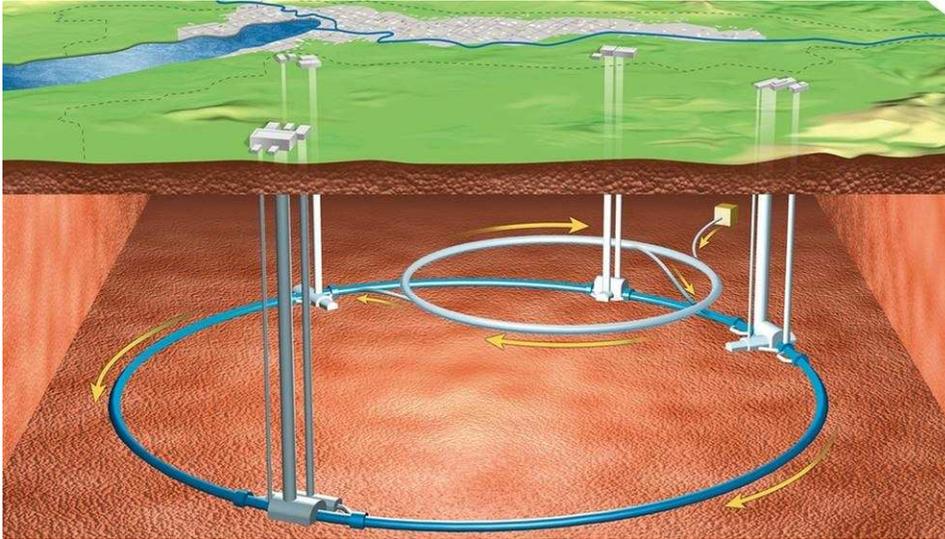
Anwendung: Magnetresonanztomographie (MRT)



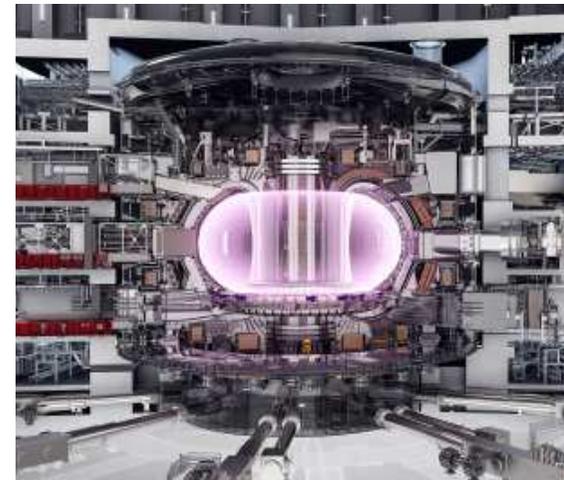
Bildquelle: IMAMED, Klinik Villa am Roseneck, MedUni Wien

3. Einleitung

Anwendung: Physikalische Grundlagenforschung



CERN Teilchenbeschleuniger

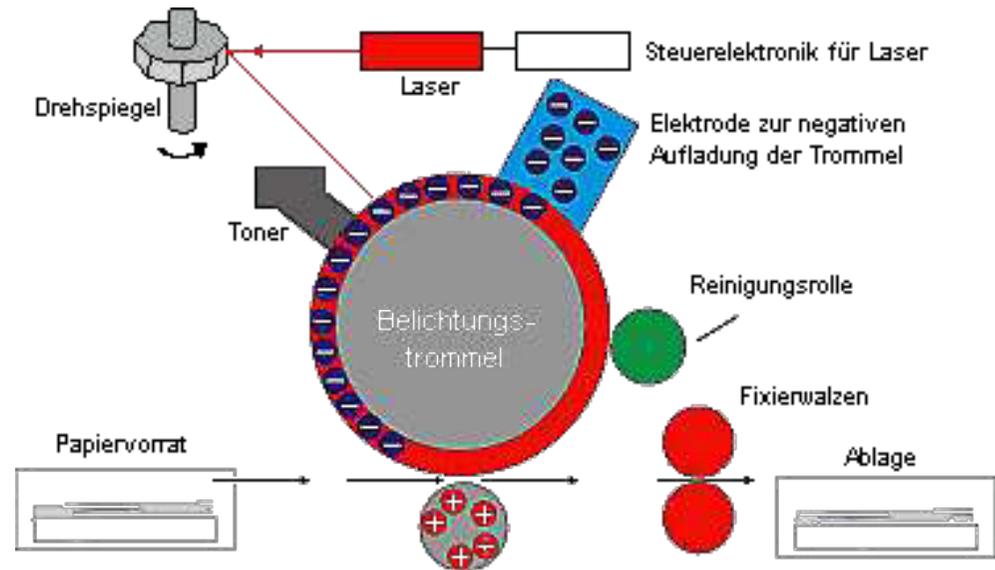


ITER Fusionsreaktor

Bildquelle: picture-alliance/dpa, CERN, ITER

3. Einleitung

Anwendung: Laserdrucker



Belichtungstrommel



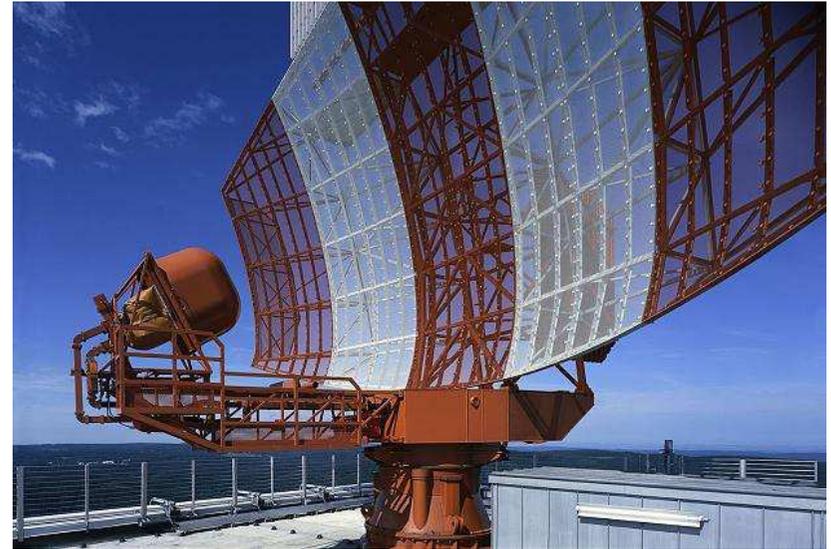
Bildquelle: LEIFI Physik, toner-tinte-kaufen.de, SAMcopy.de

3. Einleitung

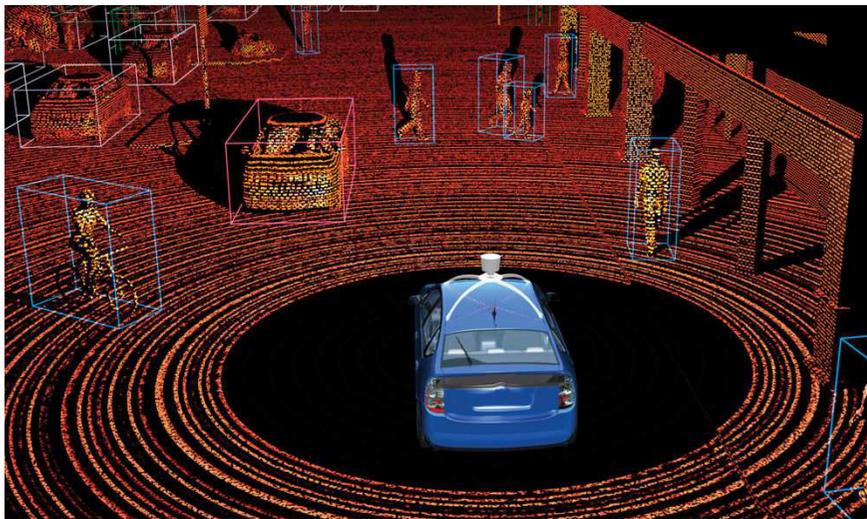
Anwendung: Nachrichtentechnik



Funktelefon



Flugsicherung



LIDAR Sensoren
für Drohnen und autonome Fahrzeuge

Bildquelle: WCYB, Focus, ClearPathRobotics

3. Einleitung

Anwendung: Das Leben, das Universum und der ganze Rest



Bildquelle: Dieter Broers

Erdmagnetfeld

Physikalische Kräfte

Schwache Kernkraft



Wichtig für radioaktiven Zerfall

Starke Kernkraft



Hält Protonen und Neutronen im Atomkern zusammen

Schwerkraft



Hält Planeten auf ihrer Bahn und uns auf der Erde

Elektromagnetische Kraft



Chemische Kräfte (halten Moleküle zusammen)

Reibung

Kräfte beim Zusammenprall von Materie

Magnetismus

Elektrostatik (u.a. wesentlich für Wetterphänomene)

...

3. Einleitung

James Clerk Maxwell (Schotte)

* 1831 in Edinburgh

1860 Professur am King's College in London

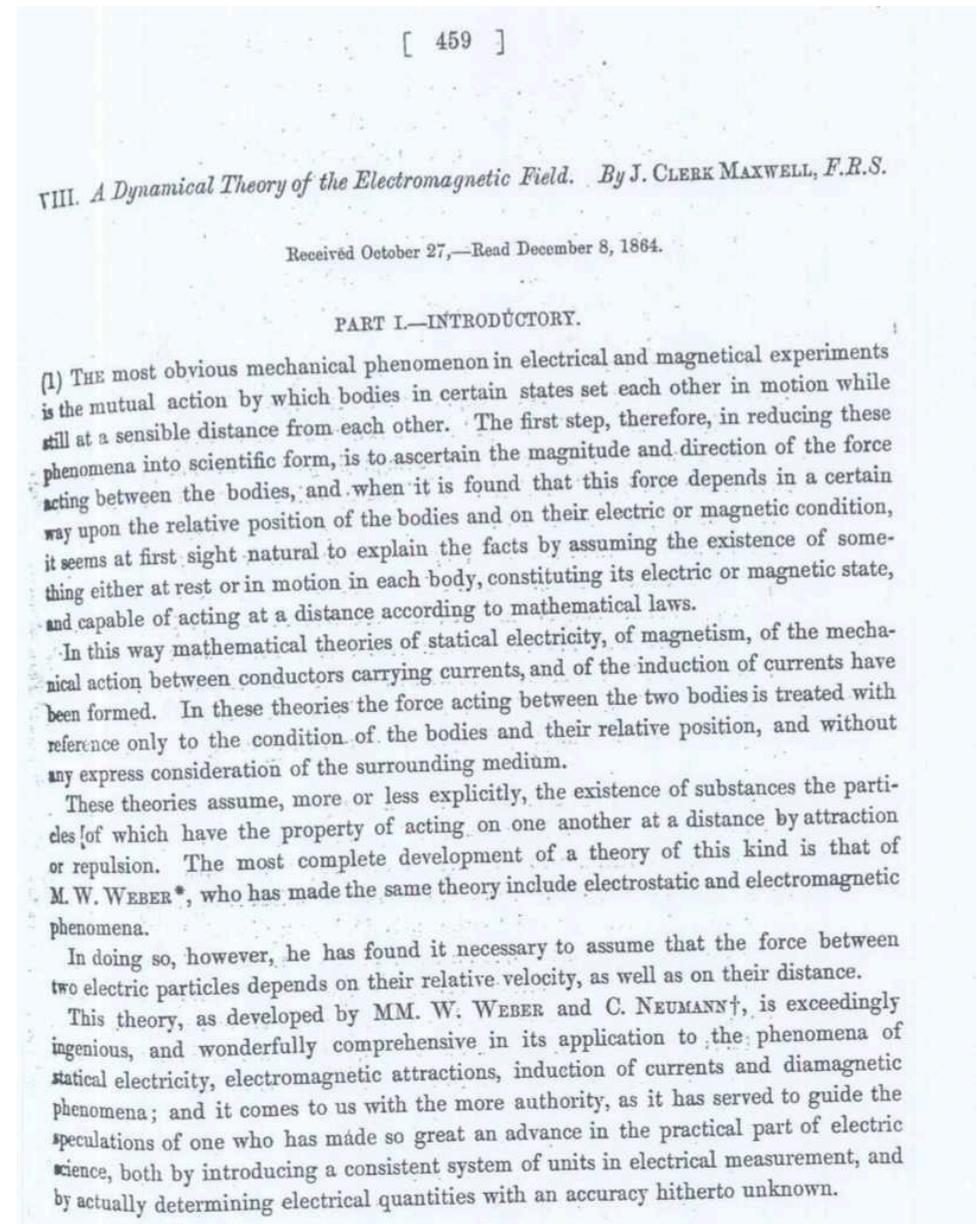
+ 1879 in Cambridge



1861 Veröffentlichung der ersten Farbfotografie,
Nachweis additiver Farbmischung

1865 Veröffentlichung von 20 Gleichungen zur
Beschreibung des Elektromagnetismus

1866 Entwicklung der kinetischen Gastheorie



3. Einleitung

Oliver Heaviside (Engländer)

* 1850 in Camden, London

+ 1925 in Homefield bei Torquay



Heaviside vereinfachte 1884 die Maxwell-Gleichungen durch Anwendung von Vektoren und Vektoranalysis, deren mathematische Theorie er zuvor maßgeblich selbst entwickelt hatte, ganz wesentlich. Er fasste 12 der 20 Gleichungen in die 4 Gleichungen zusammen, die heute noch überall angewendet werden.

Außerdem prägte er viele moderne Begriffe und Methoden der Elektrotechnik, z.B. *Impedanz* und *Induktivität*. Er war einer der ersten, die komplexe Zahlen verwendeten und konnte so Differenzialgleichungen in algebraische Gleichungen überführen. Heaviside entwickelte auch die Theorie zur Ausbreitung von Signalen in Leitungen (Leitungsgleichung).

3. Einleitung

Maxwell-Heaviside Gleichungen

Differentielle Schreibweise

$$\operatorname{div} \vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Integralschreibweise

$$\oiint_{\partial v} \vec{D} \cdot d\vec{f} = \iiint_v \rho \cdot dv$$

$$\oiint_{\partial v} \vec{B} \cdot d\vec{f} = 0$$

$$\oint_{\partial f} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\iint_f \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{f}$$

$$\oint_{\partial f} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_f \vec{J} \cdot d\vec{f} + \iint_f \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{f}$$

Gauß'sches Gesetz

Quellenfreiheit B -Feld

Induktionsgesetz
(Faraday's Law)

Durchflutungsgesetz
(Ampere's Law)

Materialgleichungen

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

4. Inhaltsverzeichnis

- Kapitel 1: Mathematische Grundlagen der Feldtheorie (1V)
- Kapitel 2: Grundlagen Elektromagnetischer Felder (1V)
- Kapitel 3: Elektrostatische Felder (4V)
- Kapitel 4: Elektrische Strömungsfelder (1V)
- Kapitel 5: Magnetische Felder (3V)
- Kapitel 6: Quasistationäre Felder (2V)

4. Inhaltsverzeichnis – Termine

V1	KW17	23.04.2019	Mathematische Grundlagen der Feldtheorie
V2	KW17	26.04.2019	Grundlagen Elektromagnetischer Felder
Ü1	KW18	30.04.2019	Mathematische Grundlagen
V3	KW18	03.05.2019	Elektrostatische Felder I
V4	KW19	07.05.2019	Elektrostatische Felder II
Ü2	KW19	10.05.2019	Elektrostatische Felder I
Ü3	KW20	14.05.2019	Elektrostatische Felder II
V5	KW20	17.05.2019	Elektrostatische Felder III
-	KW21	21.05.2019	Termin entfällt
Ü4	KW21	24.05.2019	Elektrostatische Felder III
V6	KW22	28.05.2019	Elektrostatische Felder IV
V7	KW22	31.05.2019	Elektrische Strömungsfelder
Ü5	KW23	04.06.2019	Elektrostatische Felder IV
V8	KW23	07.06.2019	Magnetische Felder I
-	KW24	11.06.2019	Termin entfällt
-	KW24	14.06.2019	Termin entfällt
Ü6	KW25	18.06.2019	Elektrostatische Felder V
-	KW25	21.06.2019	Termin entfällt
V9	KW26	25.06.2019	Magnetische Felder II
V10	KW26	28.06.2019	Magnetische Felder III
Ü7	KW27	02.07.2019	Elektrostatische Felder VI
V11	KW27	05.07.2019	Quasistationäre Felder I
Ü8	KW28	09.07.2019	Magnetische Felder I
V12	KW28	12.07.2019	Quasistationäre Felder II
Ü9	KW29	16.07.2019	Magnetische Felder II
V13	KW29	19.07.2019	Reservetermin
Ü10	KW30	23.07.2019	Quasistationäre Felder I, Fragestunde, Klausurvorbereitung
-	KW30	26.07.2019	Termin entfällt

Termine:

Dienstags von 15:45 bis 17:15 Uhr
Freitags von 11:30 bis 13:00 Uhr

Ort:

Hörsaal am Fasanengarten
Gebäude 50.35
Gotthard-Franz-Straße 7



5. Literaturempfehlungen

Marco Leone

Theoretische Elektrotechnik, Springer Verlag, Berlin

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-18317-2>

Heino Henke

Elektromagnetische Felder - Theorie und Anwendung, Springer Verlag, Berlin

<https://www.springer.com/de/book/9783642197468>

A.J.Schwab

Begriffswelt der Feldtheorie, Springer Verlag, Berlin

<https://www.springer.com/de/book/9783642563393>

W. Mathis, A. Reibiger

Küpfmüller - Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer Verlag, Berlin

<https://www.springer.com/de/book/9783662548363>

G. Strassacker, R. Süße

Rotation, Divergenz und Gradient. Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie, Springer Verlag, Berlin

<https://www.springer.com/de/book/9783835102392>

C.A. Balanis

Advanced engineering electromagnetics, Wiley and Sons, New York

<https://archive.org/details/WileyAdvancedEngineeringElectromagnetics2ndEd.2012>