



NTB
INTERSTATE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
OF TECHNOLOGY BUCHS



15. Mai 2018
Wireless Charging für die Elektrofahrzeuge
Kurt Schenk, PhD.

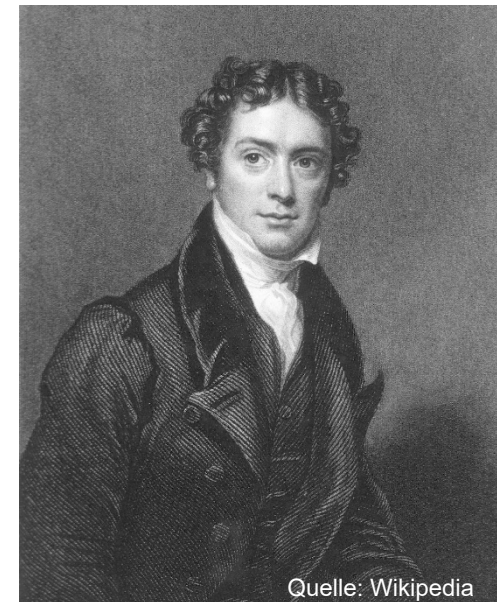
Näher dran
am System
der Technik
der Zukunft

Übersicht

- Historischer Rückblick
- Theoretische Grundlagen
- Designprozess
- Aktivitäten an der NTB
- Statistische Daten zur E-Mobilität
- Dynamisches Laden

Historisches

- Michael Faraday – Entdecker der elektromagnetischen Induktion
- 1822 erste Versuche
 - Dokumentiert in Notizbuch «Convert Magnetism into Electricity»
 - Diese Versuche waren nicht erfolgreich
- 1831 Durchbruch
 - Erste dokumentierte Experimente
 - Versuch mit Stabmagnet und Drahtwendel
 - Einfaches Grundprinzip des Generators
- Danach fokussierte er sich darauf die Einheitlichkeit der Elektrizität nachzuweisen



Historisches

- Nikola Tesla – Erste Gehversuche mit induktiver Energieübertragung
- 1887 Forscht an Drehstrommaschinen
 - Realisiert erste Zweiphasen-Synchronmaschine, welche bei 60Hz arbeitete.
 - Legte Grundstein für heutiges Mehrphasen-Wechselstromsystem.
- 1889 Richtet Fokus auf hochfrequente Wechselströme.
 - Teslaspule
 - Geburt der Idee, Energie drahtlos mittels hochfrequenten magnetischen Feldern zu übertragen.
- 20. März 1900 erstes Patent für drahtlose Energieübertragung



Erste Meilensteine für Kommerzialisierung

- Ab ca. 1995 erste Verbreitung der kabellosen Zahnbürste.
- 1999 Conductix Wampfler stellt an der Weltausstellung in Hannover den ersten Aufzug mit induktiver Energieübertragung vor.
- 2002 Conductix Wampfler lädt in Genua und Turin die ersten Elektrobusse kontaktlos.
- 2007 WiTricity überträgt 60W auf Glühbirne in 2m Distanz.
- 2008 Gründung des Wireless Power Consortiums, aus welchem der Qi-Standard hervorgeht.
- Erste Smartphones können induktiv geladen werden.
- 2015 kommerzielle 3.5kW induktive Ladegeräte für E-Fahrzeuge verfügbar.



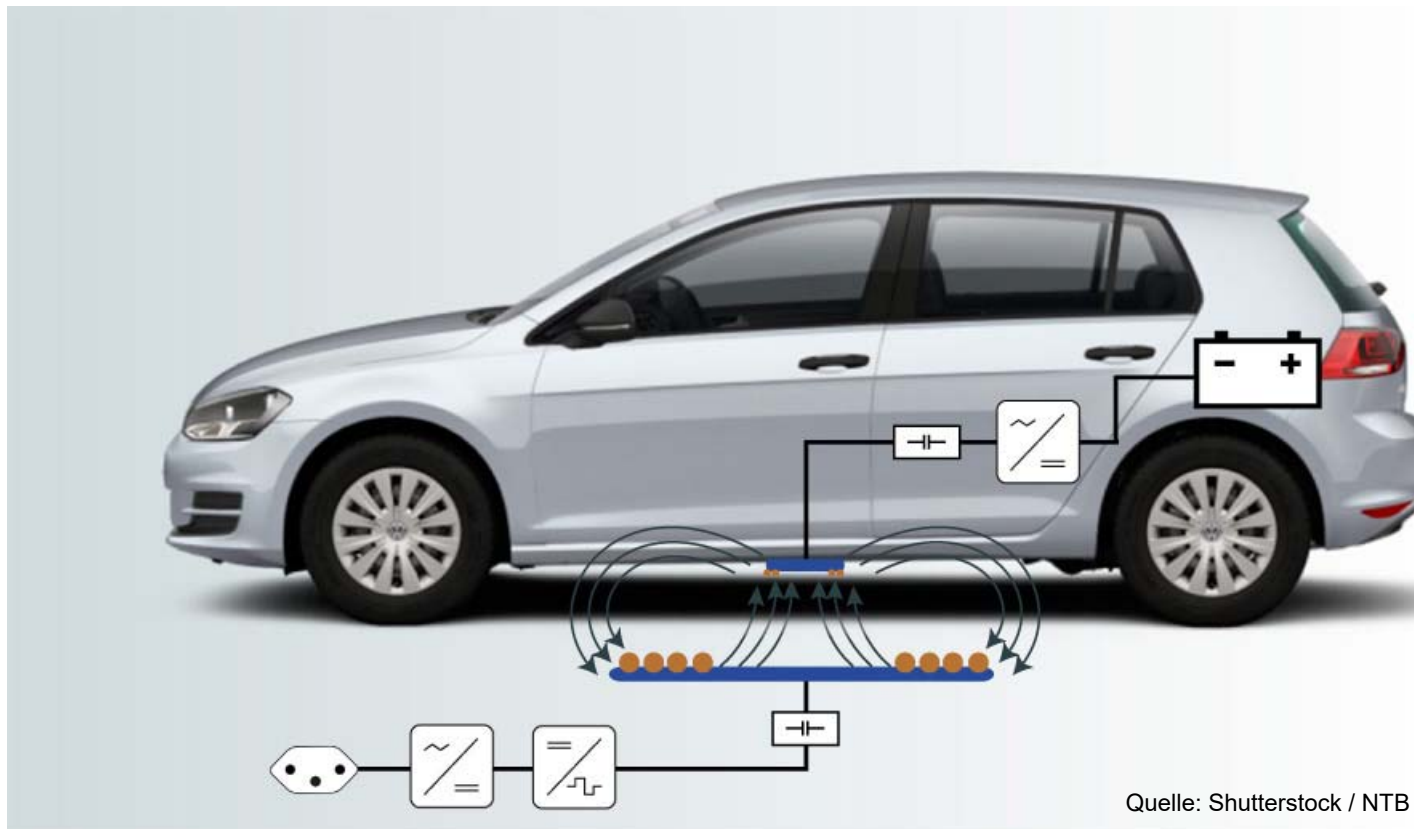
Quelle: Wikipedia

Motivation

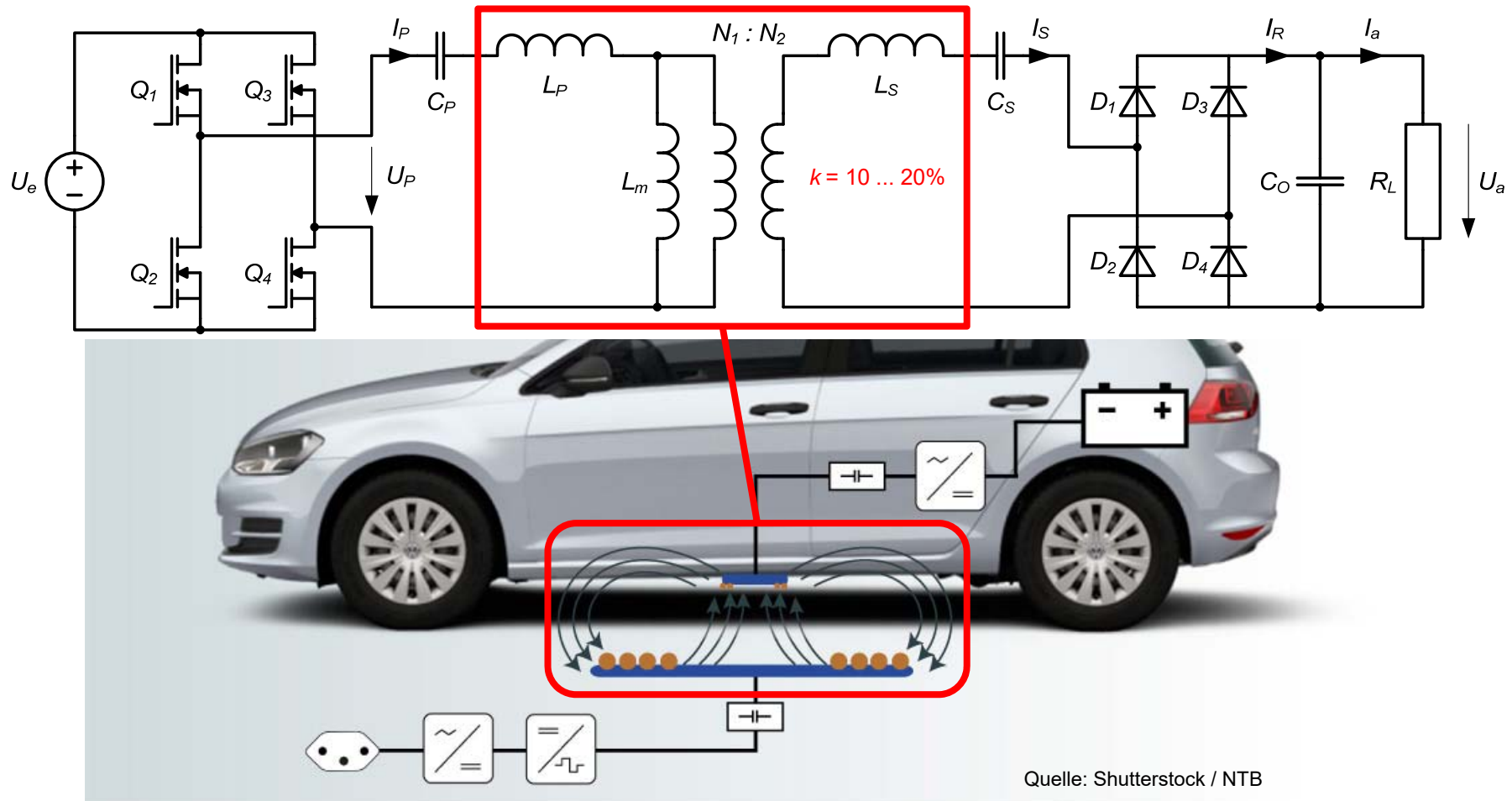
- Komfort:
 - Keine Handhabung von Kabeln
 - Es müssen nicht verschiedene Kabel mitgeführt werden für unterschiedliche Ladestationen
 - Für schnelles und ultraschnelles Laden werden Kabel unhandlich
- Sicherheit:
 - Rückspeisung der Batterie im Fehlerfall ist praktisch unmöglich
 - Keine leitende Verbindung zwischen Ladestation und Fahrzeug
- Zuverlässigkeit:
 - Keine Steckkontakte
 - Keine beweglichen Teile



Wireless Power Transfer Prinzip

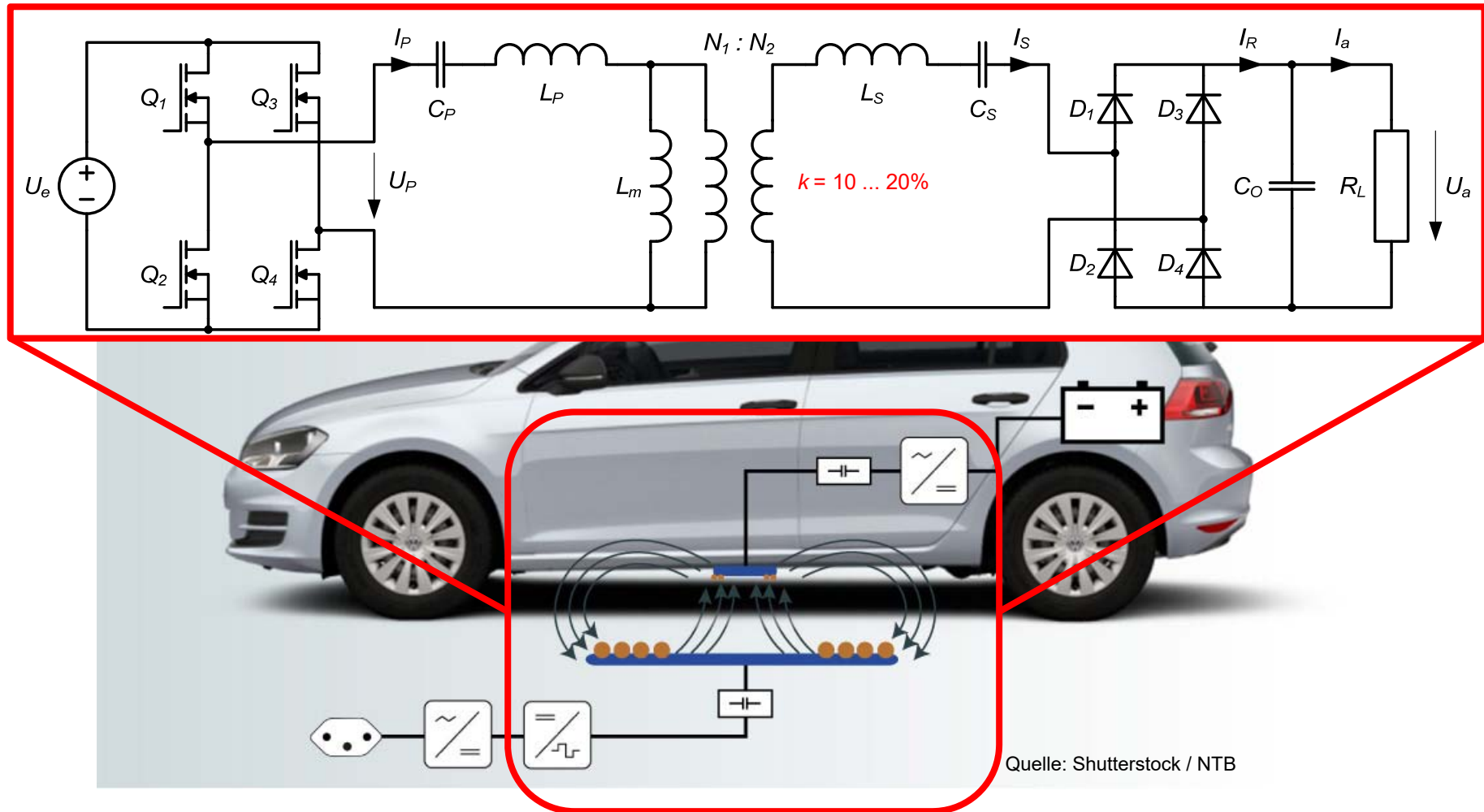


Wireless Power Transfer Prinzip



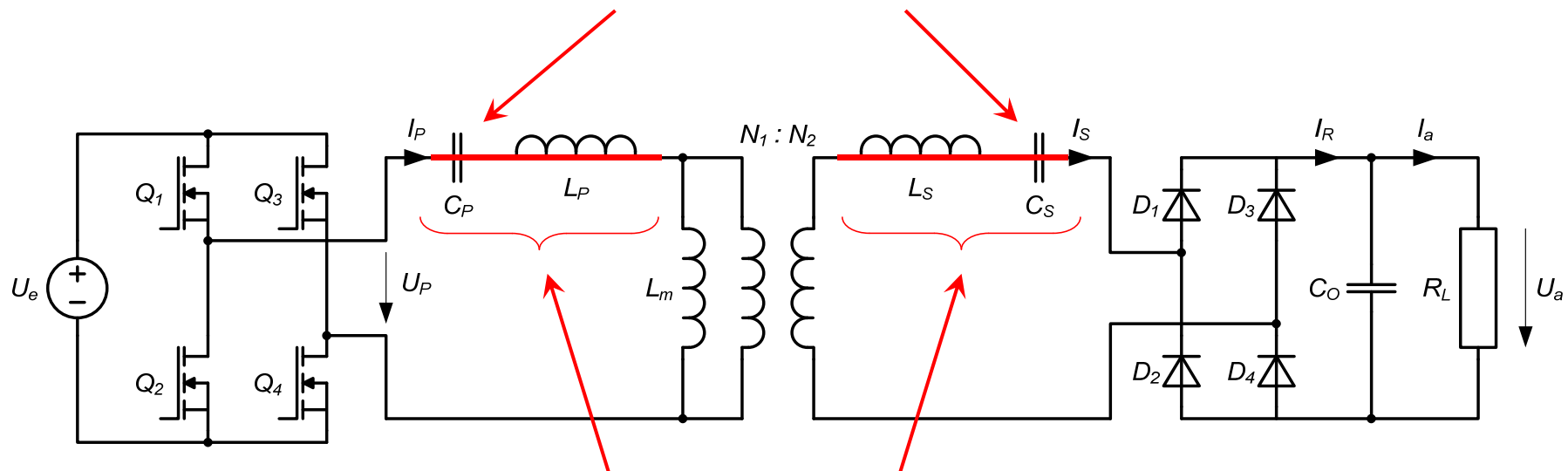
Quelle: Shutterstock / NTB

Wireless Power Transfer Prinzip



Serie-Kompensation

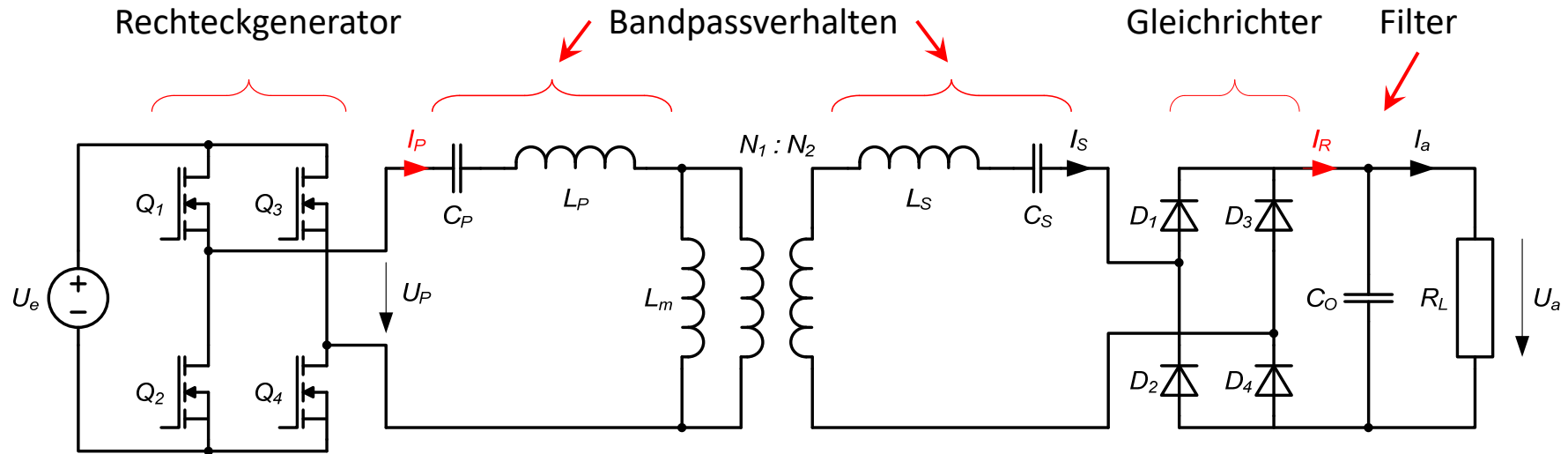
Serie-Kompensation der Streuinduktivitäten



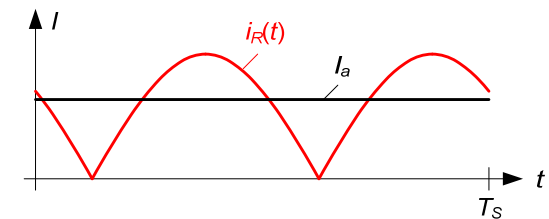
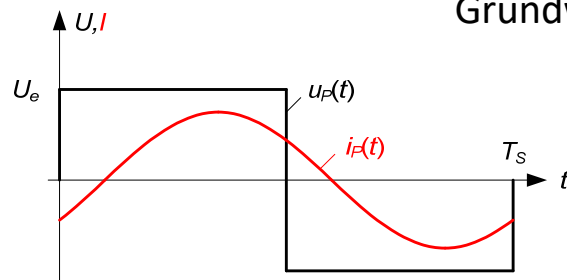
Bei Resonanzfrequenz wird Impedanz null

- Trifft nur für eine bestimmte Geometrie-Konstellation bei einer bestimmten Frequenz zu.
- Variation des Luftspalts (Bodenfreiheit) und lateraler Versatz (ungenaueres Parkieren) beeinflussen die Induktivitätswerte und damit den Kopplungsfaktor k .
- Wichtiges Designziel des Kopplers ist die Variation von k möglichst klein zu halten.

Analytische Beschreibung



Ströme im Koppler werden sinusförmig
 Grundwelle ist hauptsächlich aktiv



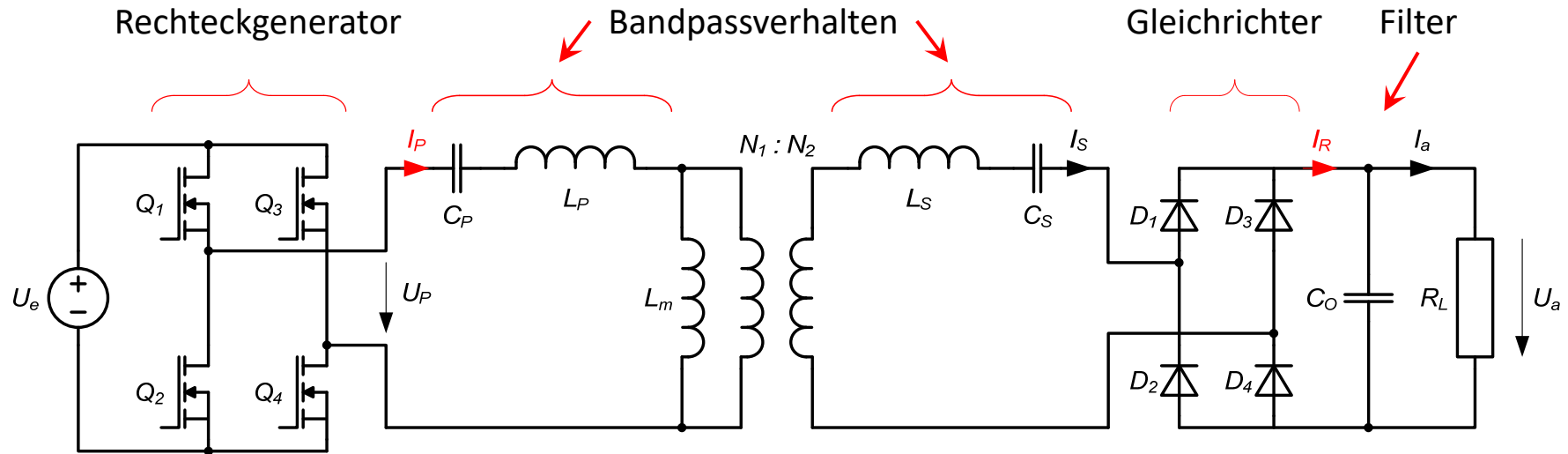
I_a entspricht Mittelwert von I_R

$$I_a = I_{R,AV} = \frac{2}{\pi} \hat{I}_R = \frac{2}{\pi} \hat{I}_S$$

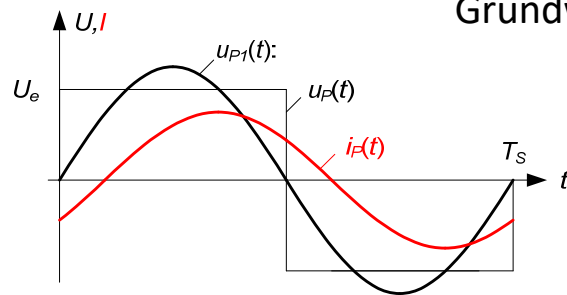
Leistung P

$$P = I_a^2 R_L \quad \Rightarrow \quad P = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

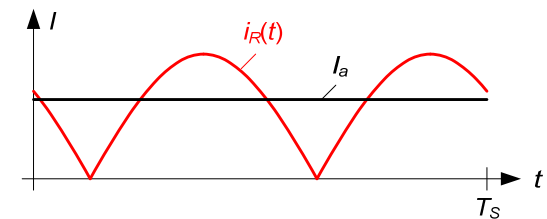
Analytische Beschreibung



Ströme im Koppler werden sinusförmig
Grundwelle ist hauptsächlich aktiv



Grundwelle $\hat{U}_{P1} = \frac{4}{\pi} U_e$



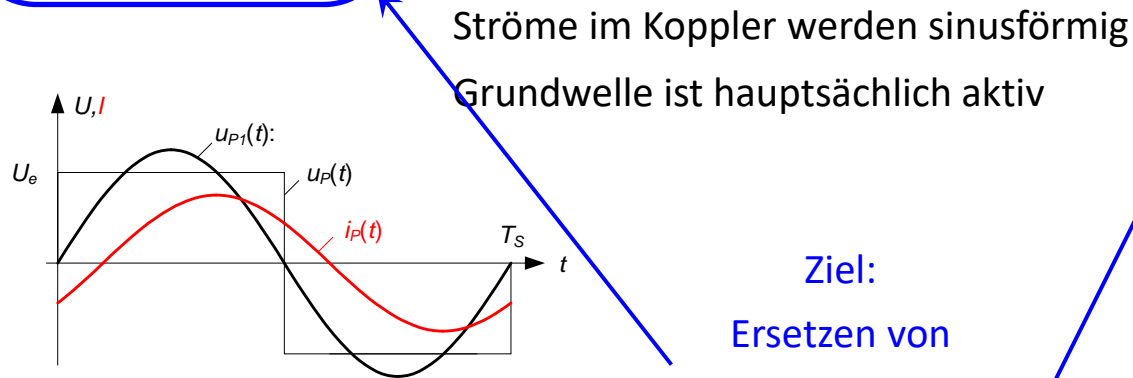
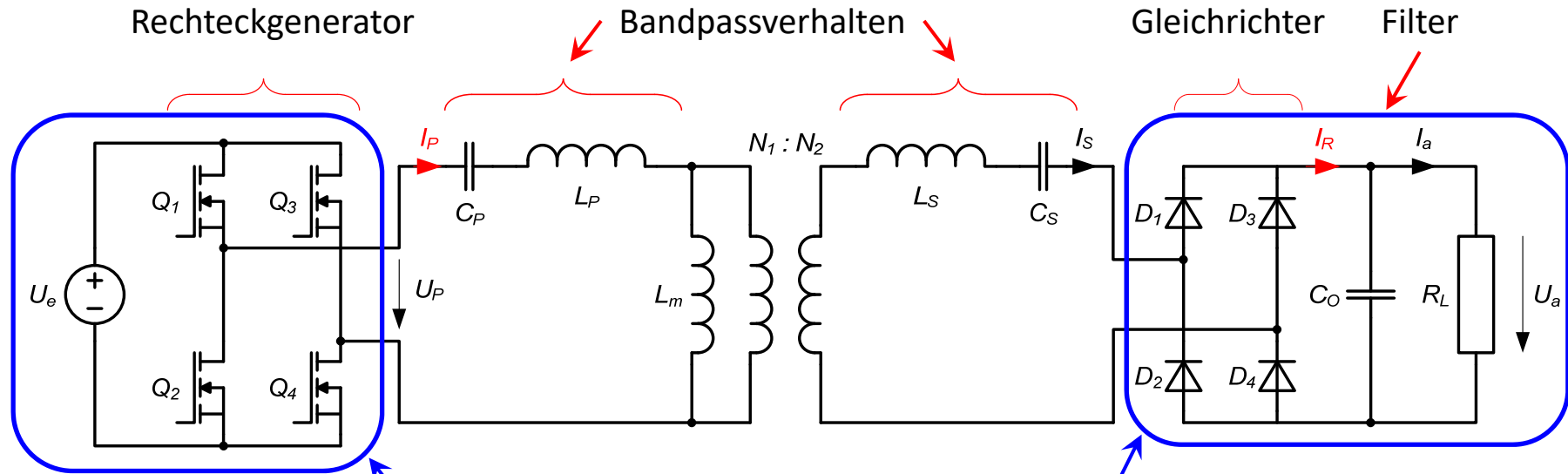
I_a entspricht Mittelwert von I_R

$$I_a = I_{R,AV} = \frac{2}{\pi} \hat{I}_R = \frac{2}{\pi} \hat{I}_S$$

Leistung P

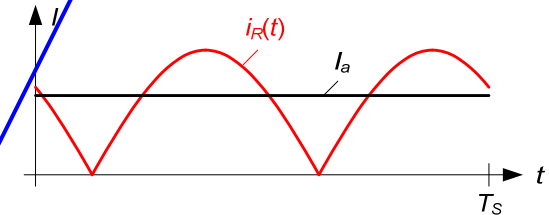
$$P = I_a^2 R_L \Rightarrow P = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

Analytische Beschreibung



Grundwelle $\hat{U}_{P1} = \frac{4}{\pi} U_e$

Ziel:
 Ersetzen von
 Rechteckgenerator
 Gleichrichter mit Filter



I_a entspricht Mittelwert von I_R

$$I_a = I_{R,AV} = \frac{2}{\pi} \hat{I}_R = \frac{2}{\pi} \hat{I}_S$$

Leistung P

$$P = I_a^2 R_L \Rightarrow P = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

First Harmonic Approximation

Rechteckgenerator
ersetzt durch Sinusquelle

Gleichrichter, Filter und Last ersetzt
durch äquivalenten Widerstand R_E

Leistung an R_E

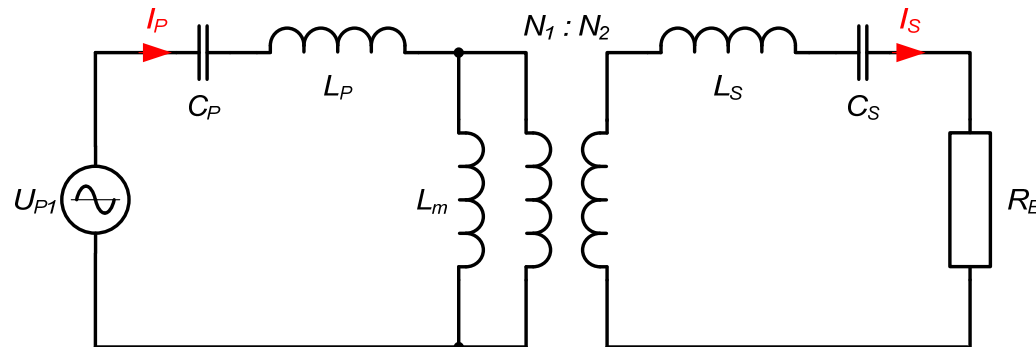
$$P = I_{S,RMS}^2 R_E = \frac{\hat{I}_S^2}{2} R_E$$

muss identisch bleiben

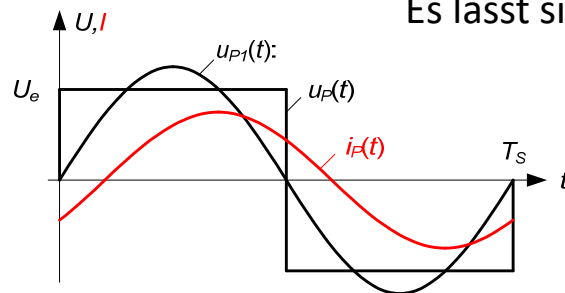
$$\frac{\hat{I}_S^2}{2} R_E = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

Damit wird R_E

$$R_E = \frac{8}{\pi^2} R_L$$

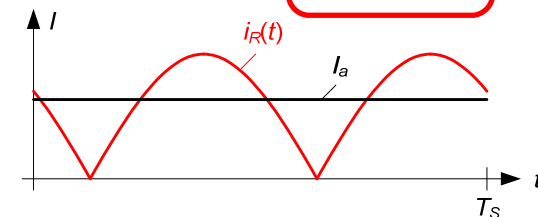


Diese Schaltung ist eine Approximation
Es lässt sich damit aber einfacher rechnen



Grundwelle

$$\hat{U}_{P1} = \frac{4}{\pi} U_e$$



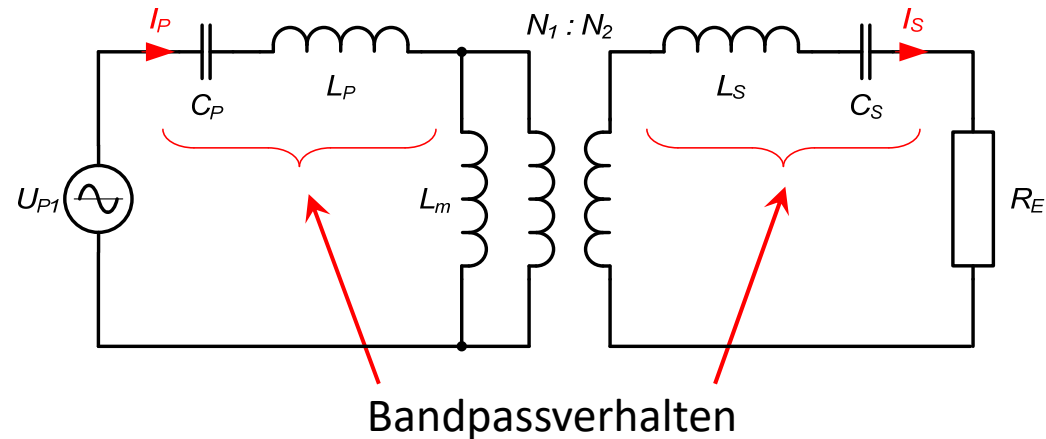
I_a entspricht Mittelwert von I_R

$$I_a = I_{R,AV} = \frac{2}{\pi} \hat{I}_R = \frac{2}{\pi} \hat{I}_S$$

Leistung P

$$P = I_a^2 R_L \Rightarrow P = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

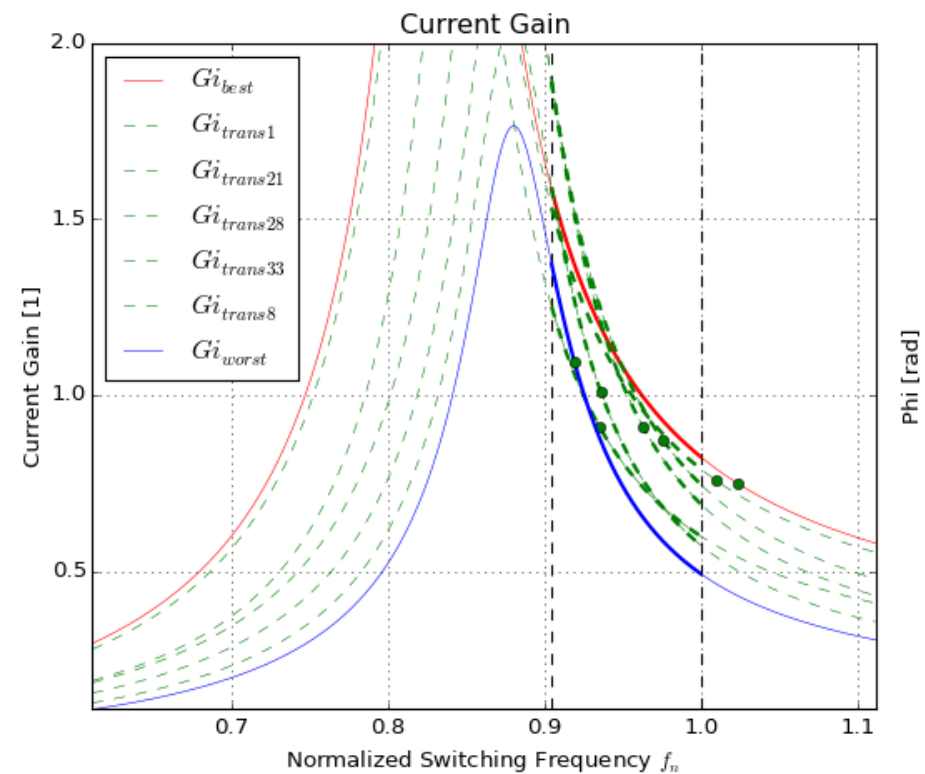
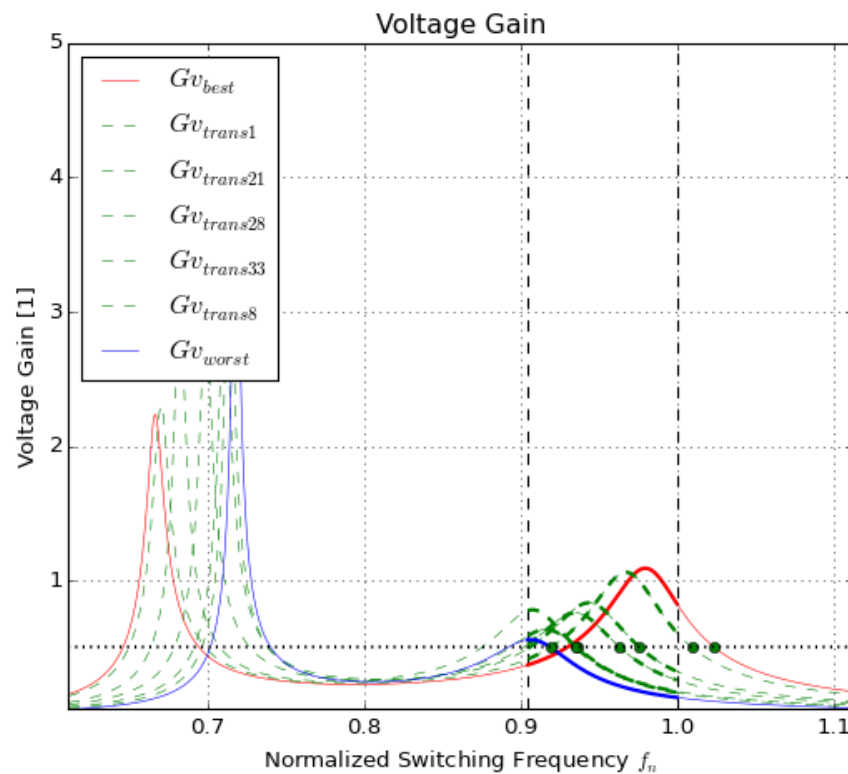
Vereinfachte Schaltung



- Durch Variation der Frequenz kann Ausgangsspannung eingestellt werden
- Zur Verfügung stehender Frequenzbereich 81 bis 90kHz (wird normiert)
- Dies muss Parametervariation und alle möglichen Lastfälle abdecken
 - Bodenfreiheit, Versatz, Batteriespannung, Leistung
- Sorgfältiger Koppler-Design unterstützt dies (kleine Variation von k)
- Verstimmung zwischen Primär- und Sekundärresonanz ergibt zusätzlichen Freiheitsgrad

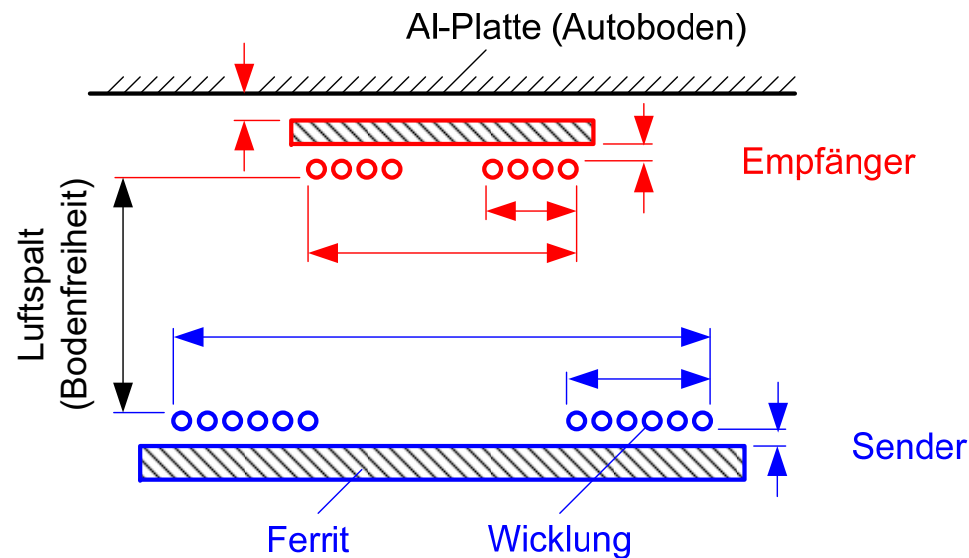
Beispiel Kurvenscharen

Spannungs- und Stromverstärkung für verschiedene Kopplerpositionen

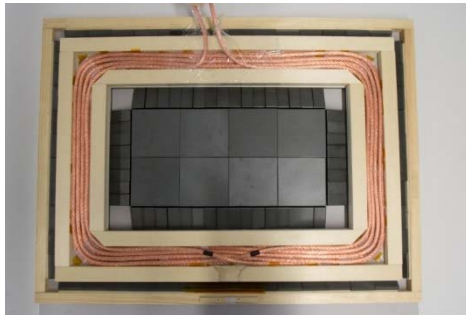


Koppler-Design

Schematischer Aufbau eines Zirkularen Kopplers



Beispiel eines Senders



Design Constraints

Optimiertes Design ohne Einschränkungen führt zu gleichen Abmessungen in Sender und Empfänger.

Oft sind Abmessungen des Empfängers limitiert.

Je grösser der Luftspalt, desto grösser wird der Sender.

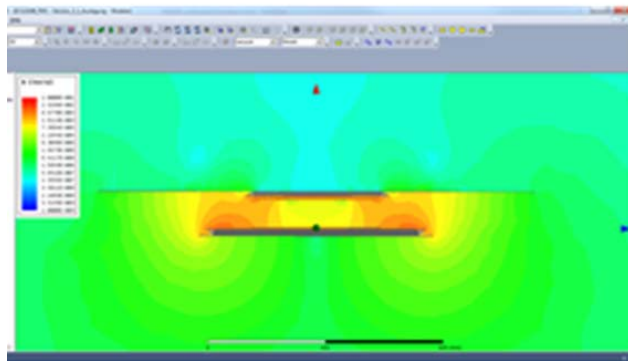
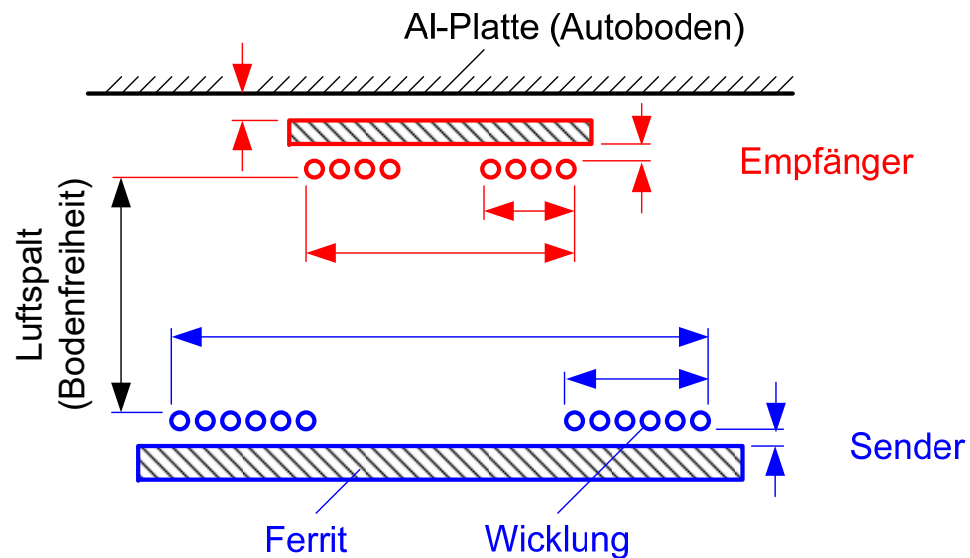
Alle angegebenen Distanzen beeinflussen Verhalten.

Zusätzlich auch die Ausgestaltung der Ferritplatten (Feldführung).

Weiterer Freiheitsgrad: Form in x-y Ebene (rund, quadratisch, rechteckig, ...).

Koppler-Design

Schematischer Aufbau eines Zirkularen Kopplers



FEA Simulation

Liefert Flussverteilung

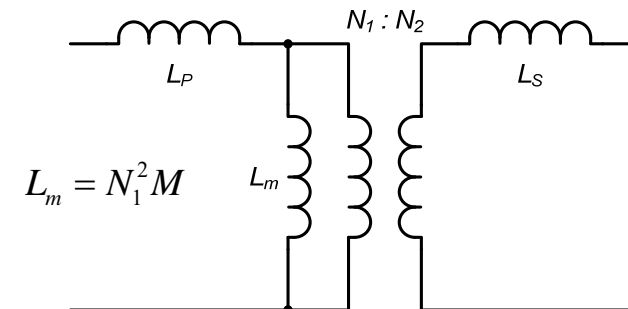
Primäre Eigeninduktivität pro Windung L_1

Sekundäre Eigeninduktivität pro Windung L_2

Gegeninduktivität M bezogen auf je eine Windung.

Aus L_1 , L_2 und M können die Induktivitäten des Ersatzschaltbildes berechnet werden

$$L_p = N_1^2 (L_1 - M) \quad L_s = N_2^2 (L_2 - M)$$



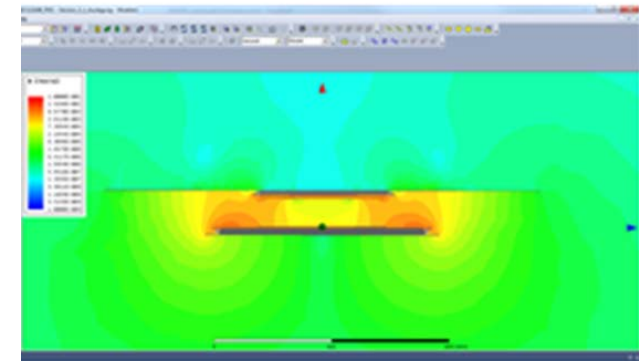
Designprozess

Spezifikation

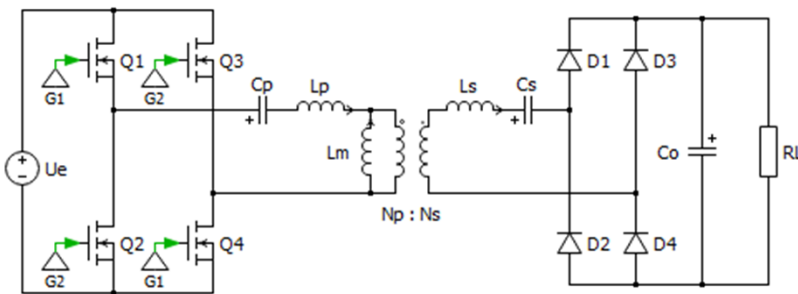
Eingangsspannung	600V
Ausgangsspannung	330 – 450V
Leistung	0 – 22kW
Frequenz	81 – 90kHz
Resonanzspannung	< 3kVrms
Luftspalt	110 – 170mm
Versatz	100 x 150mm

Geometrie

FEA Analysis

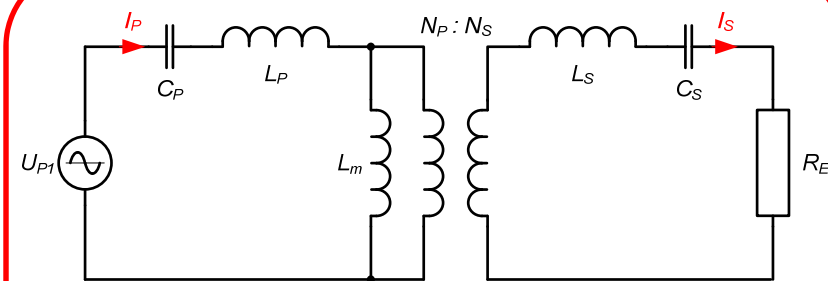


**Transformator
Modell**



Simulation

Der exakten Schaltung

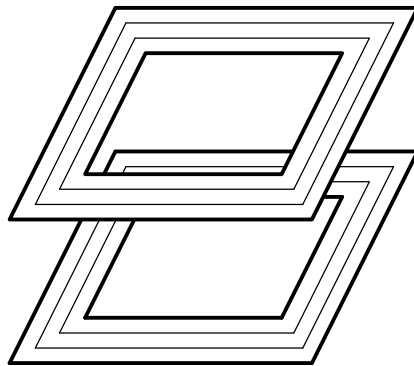


Analytische Optimierung

C_p , C_s , N_p und N_s

Koppler-Topologien

Circular

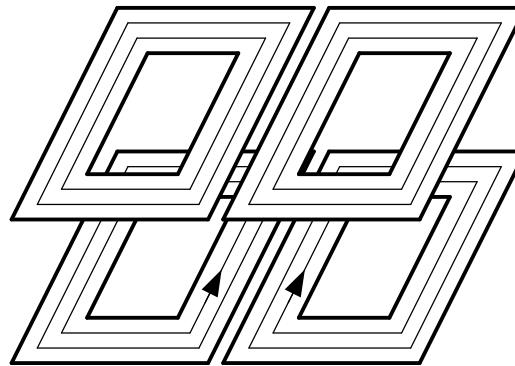


Am häufigsten
verwendet

Bei allen NTB Designs

Einfacher Aufbau

Double-D

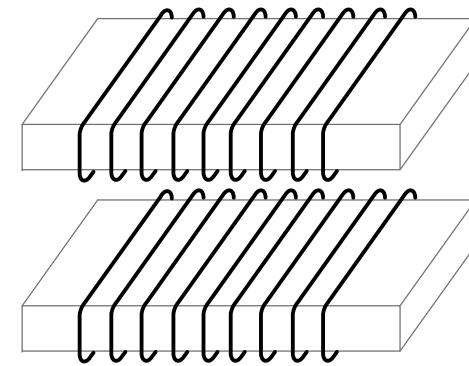


Weniger Streufelder

Verwendung z.B. bei
Qualcomm

Etwas bessere
Kopplung

Solenoid

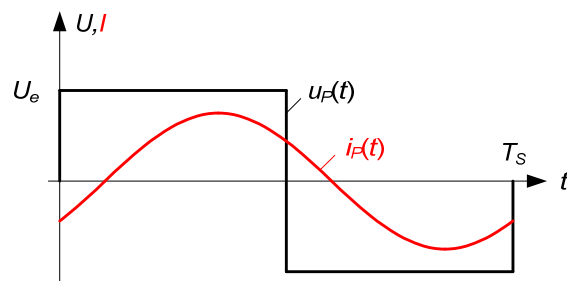
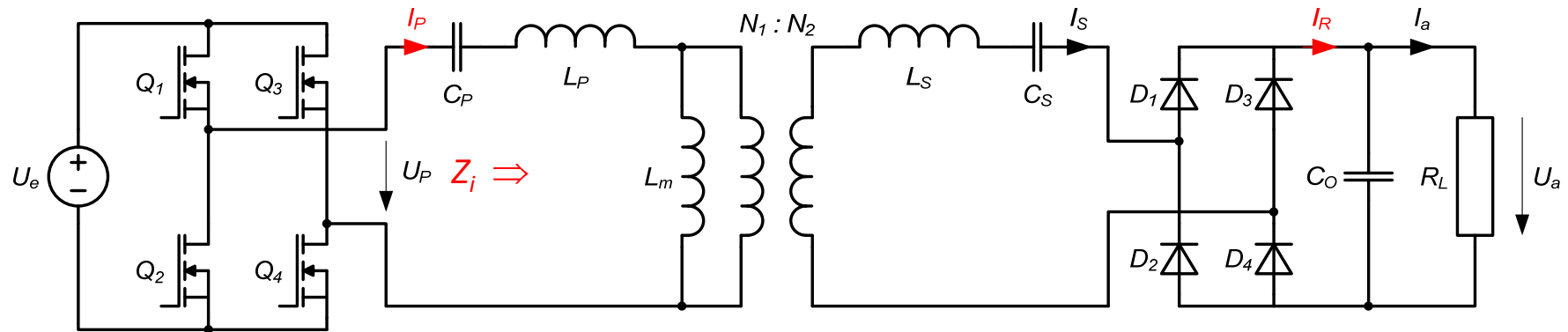


Seltener verwendet

Schlechter bezüglich
Streufelder

Soft Switching

Ursprüngliche Schaltung



Überresonanter Fall

Unterresonant

$$|\omega L_p| < \left| \frac{1}{\omega C_p} \right|$$

$Z_i = \text{kapazitiv} \Rightarrow \text{Strom ist voreilend}$

Überresonant

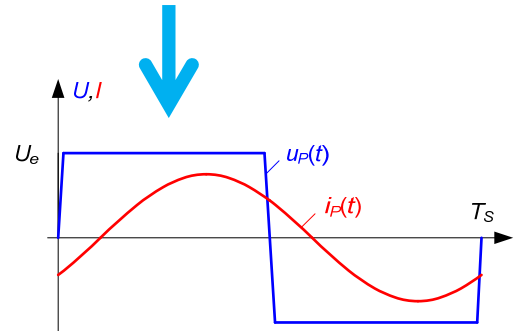
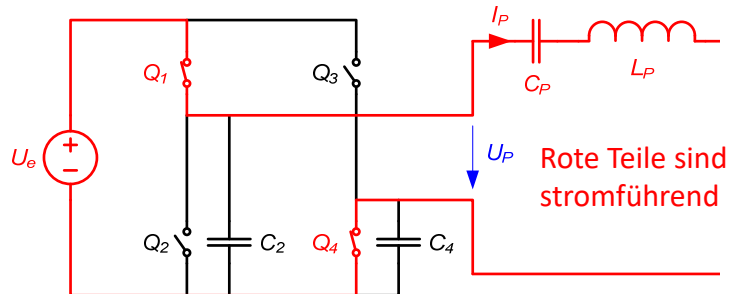
$$|\omega L_p| > \left| \frac{1}{\omega C_p} \right|$$

$Z_i = \text{induktiv} \Rightarrow \text{Strom ist nacheilend}$

Überresonanter Fall erlaubt Soft Switching

Soft Switching Intervalle

Positive Halbwelle

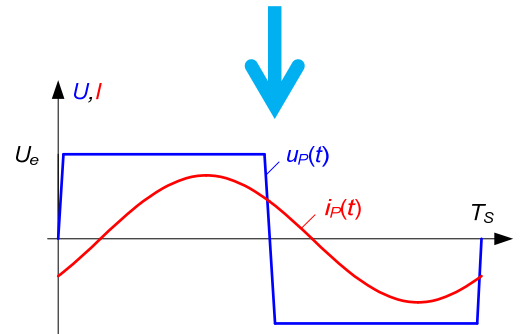
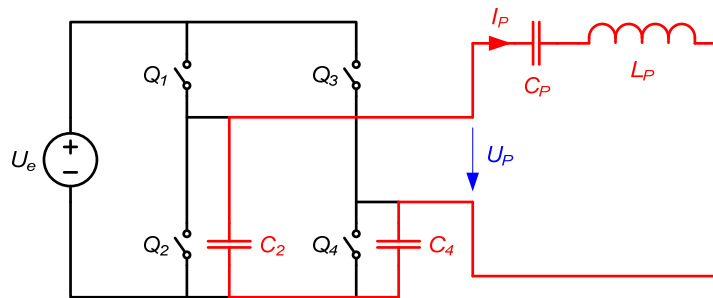


Positive Halbwelle

C_2 geladen, C_4 entladen

Intervall endet wenn Q_1 und Q_4 öffnen.

Transition-Intervall



Transition-Intervall

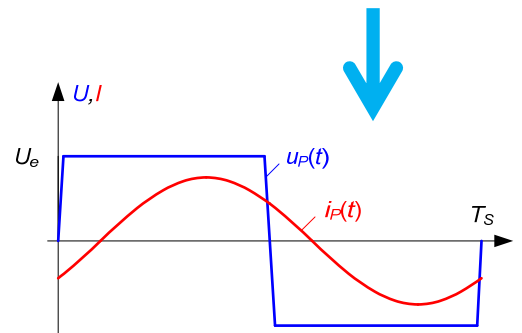
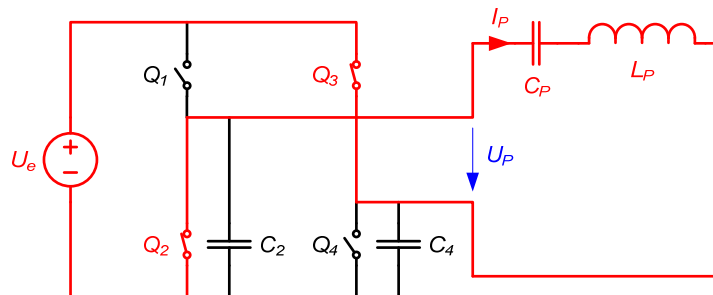
Strom I_P ist positiv

C_2 wird entladen, C_4 geladen

Während Q_1 und Q_4 ausschalten steigt Spannung nur wenig an.

Wenn die C's umgeladen sind, können Q_2 und Q_3 spannungsfrei einschalten

Negative Halbwelle



Negative Halbwelle

Am Ende ist Strom I_P negativ

Damit können die C's wieder umgeladen werden.

Ermöglicht wieder soft Aus- und spannungsfreies Einschalten

Challenges

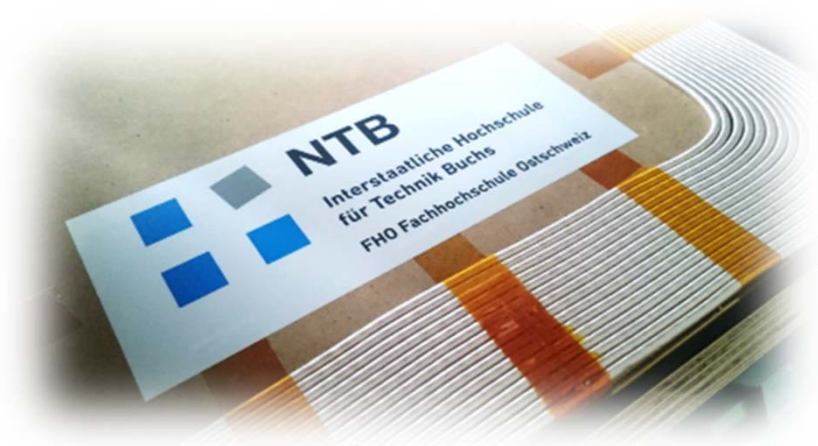
- Streufelder:
 - Im von Menschen zugänglichen Bereich sind $6.25\mu\text{T}$ erlaubt für Frequenzen bis 100kHz
 - Vergleich: Erdmagnetfeld in Mitteleuropa ca. $48\mu\text{T}$ (0 Hz)
 - Flussdichte im aktiven Bereich bis ca. 100mT
- Positionierung:
 - Die Systemparameter und damit das Übertragungsverhalten wird stark durch Variation der geometrischen Verhältnisse beeinflusst
 - D.h. variable Bodenfreiheit und lateralen Versatz zwischen Sender und Empfänger
 - Grösste Herausforderung ist nicht grosser Luftspalt, sondern grosse Variation der geometrischen Verhältnisse
- Fremd- und Lebendobjekterkennung:

Interoperabilität

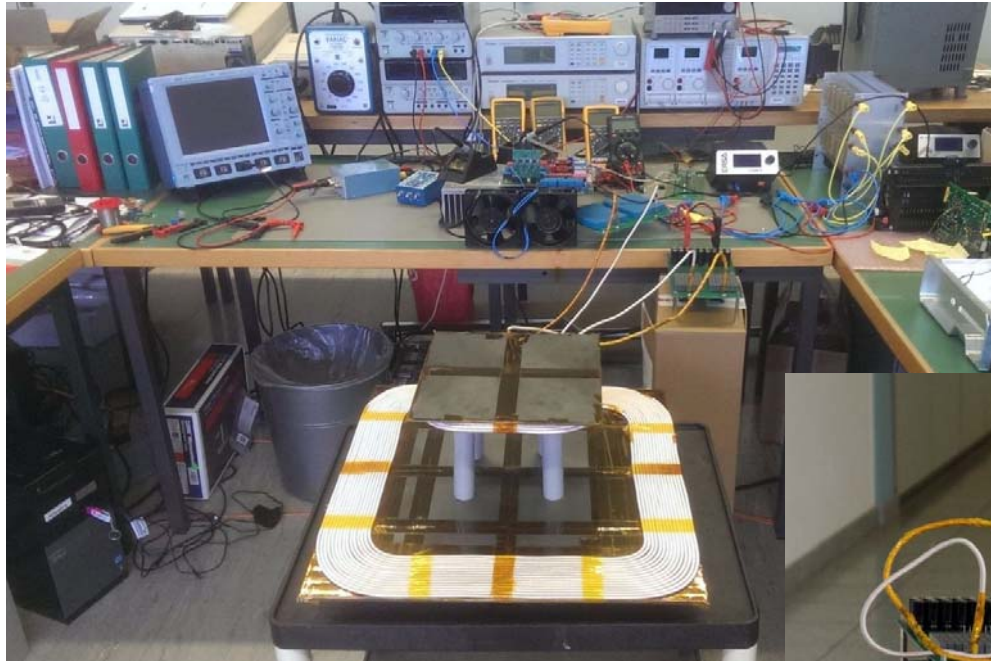
- Heutige Wireless Charger für E-Mobilität werden als Set von Sender und Empfänger aufeinander abgestimmt entwickelt.
- Hersteller verfolgen ihre eigene Systeme
 - Abgestimmte Geometrien
 - Spulentopologien (Zirkular, Double-D und Solenoid)
 - Kommunikation
- Mittelfristig müssen Systeme Interoperabel sein
 - Das verlangt definierte Standards
 - Normierungsprozess steht noch ziemlich am Anfang für E-Mobilität
- Zum Vergleich: Qi-Standard besteht seit 2008, heute für Leistungen bis 120W

Wireless Charging an der NTB

- 2012 Entwicklung eines 3.5kW Systems für die BRUSA Elektronik AG
- 2014 Steigerung der Leistung auf 7.2kW bei nahezu gleicher Grösse aber mit Wasserkühlung
- 2015 – 2017 KTI Projekt mit einer Leistung von 11 und 22kW
- Ab 2017 Übernahme des SCCER Mobility Tasks «Innovative Ladetechnik»
- Ab 2017 Schweizer Vertretung beim IEA HEV TCP, Task 26 «Wireless Charging»



3.5kW Funktionsmuster



Eingangsspannung: 400V

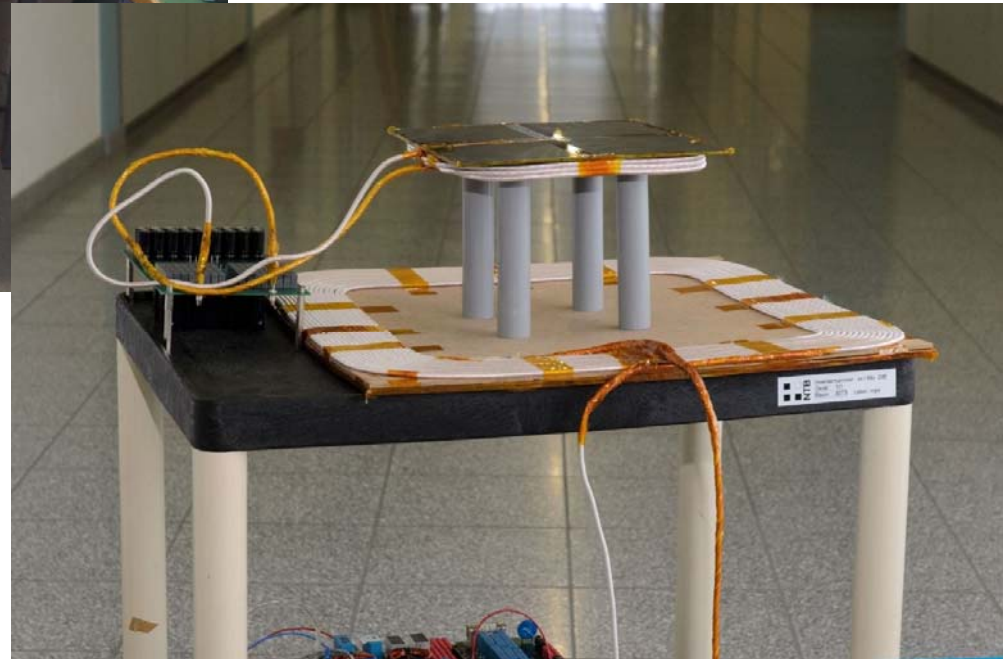
Ausgangsspannung: 310 - 410V

Sender: 48 x 48 cm

Empfänger: 24 x 24cm

Luftspalt: 50 – 160mm

x-y Versatz: 100 / 100m



3.5kW Wirkungsgrad

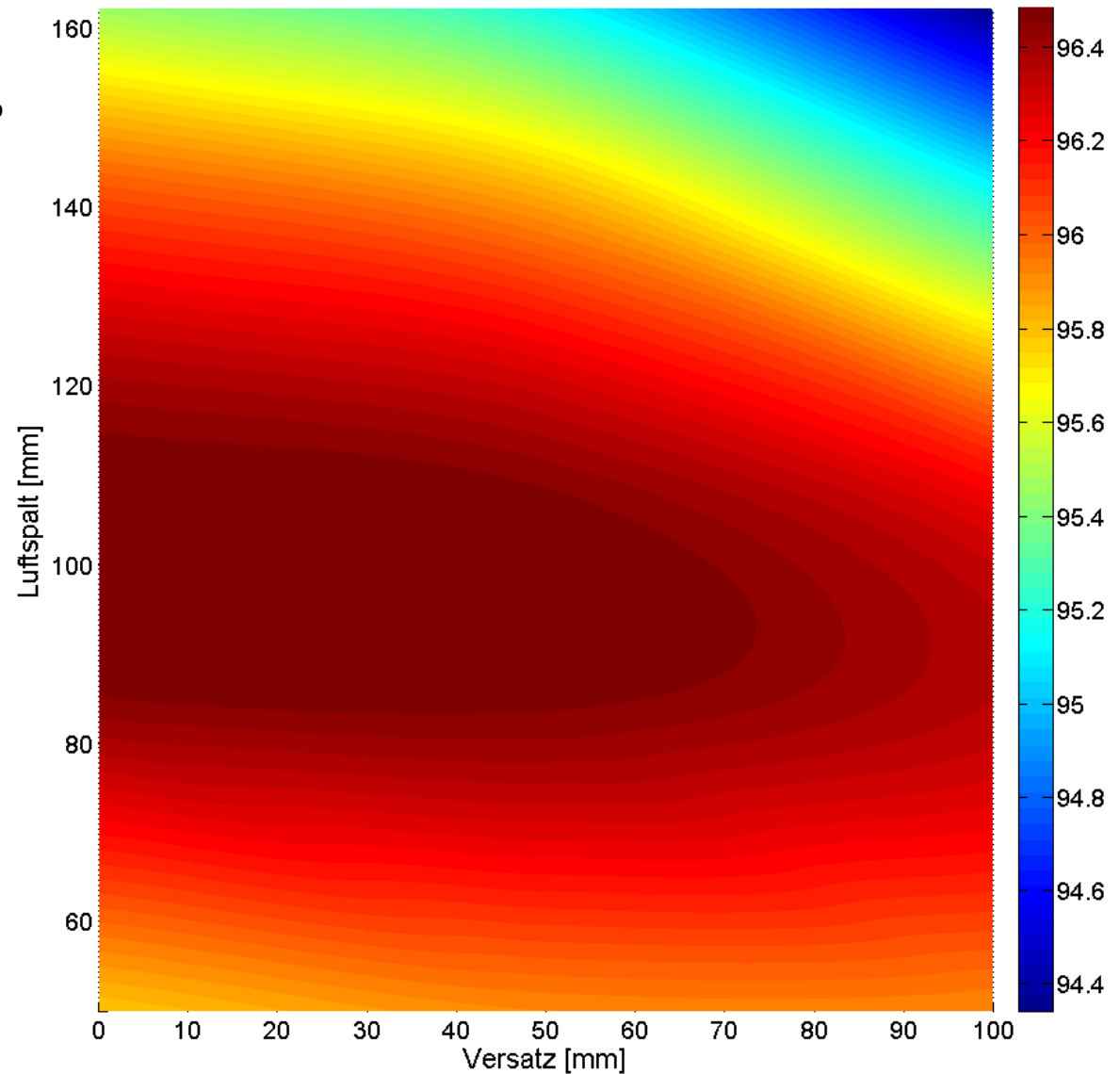
Wirkungsgrad 94.4 – 96.4%

Abhängig von

- Luftspalt
- Versatz

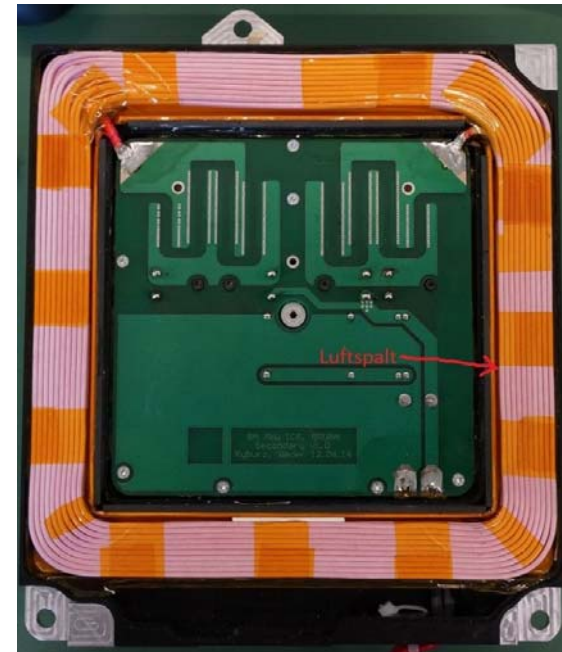
Gemessen zwischen
400Vdc Eingang und
400Vdc Ausgang

Ohne Aluminiumblech
(Fahrzeugkarosserie)



7.2kW Funktionsmuster

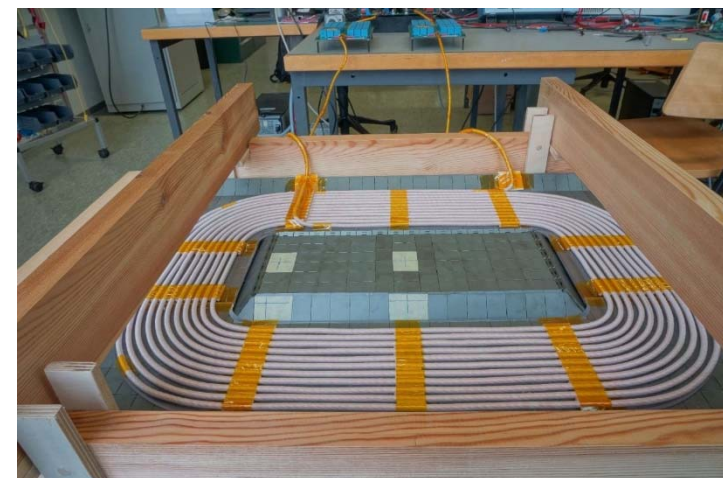
Empfänger



Testaufbau

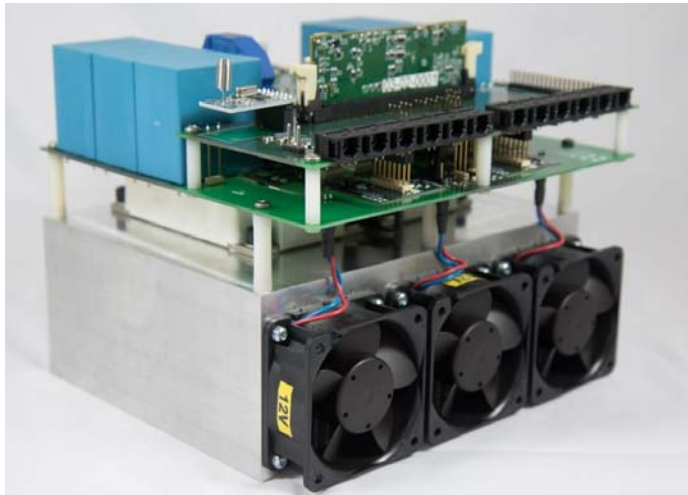


Sender

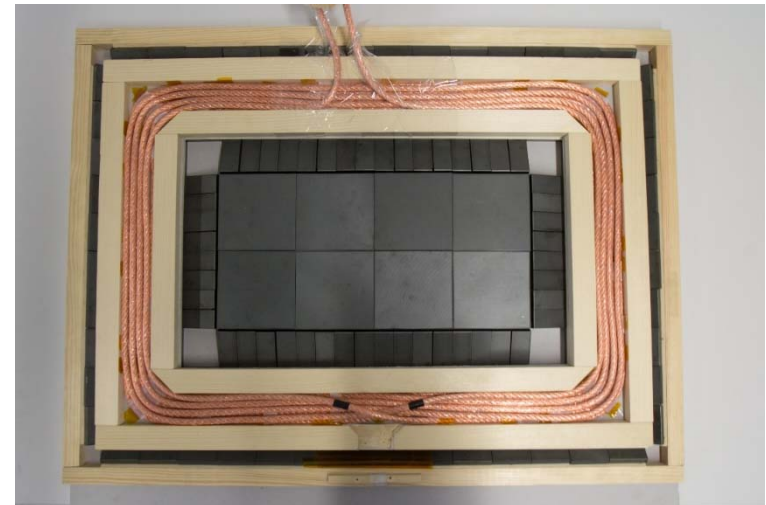


11kW und 22kW Prototypen

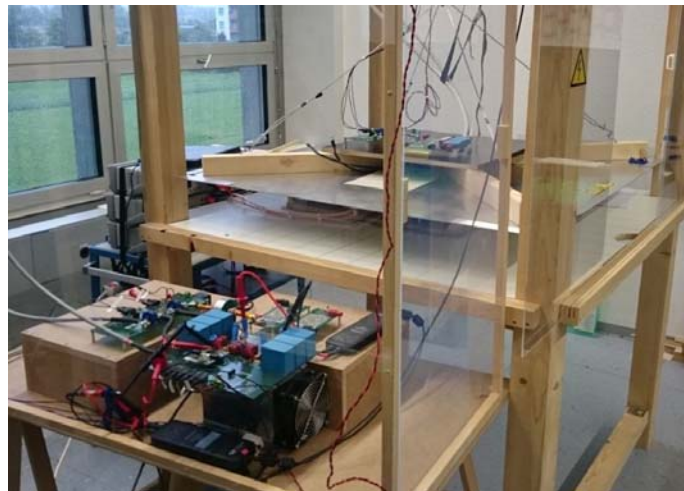
Primärseitige Leistungselektronik



Sender



Teststand



Empfänger

Industrielle Produkte

BRUSA Elektronik AG

3.5kW



Bombardier, Primove

3.5kW, 7.2kW und 22kW



Plugless, Evatran Group

3.5kW

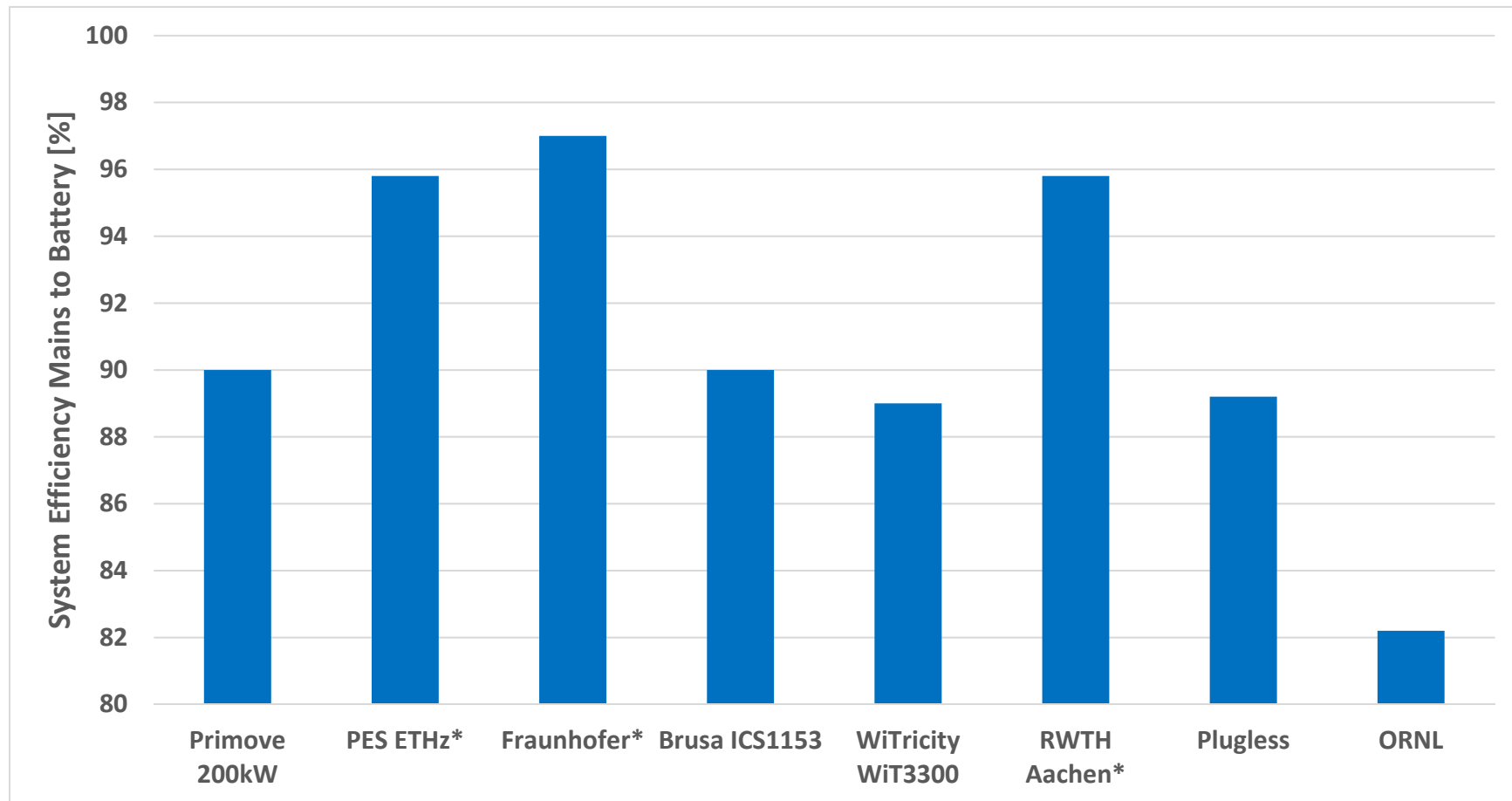


Qualcomm, Halo, 3.3kW bis 22kW



Wirkungsgradvergleich

Gemäss Angaben der Hersteller, bzw. Institute



* DC-DC efficiency only, without PFC front end.

Konduktiv vs. induktiv

Leistungselektronik

auf Fahrzeug

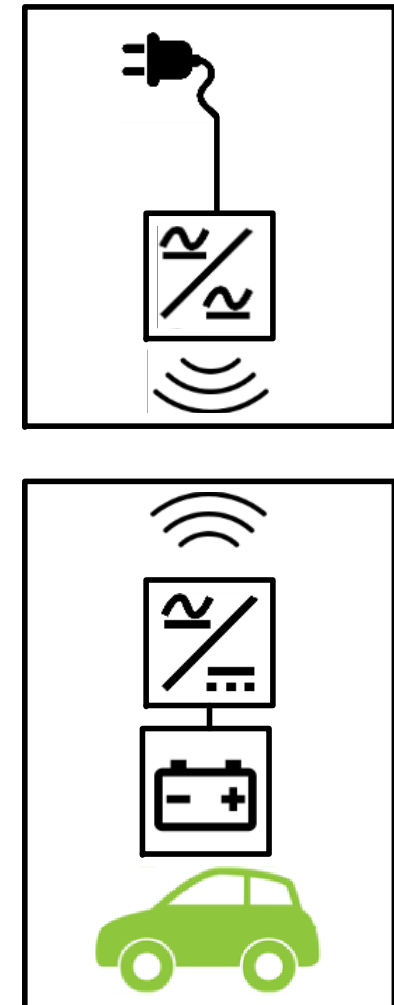
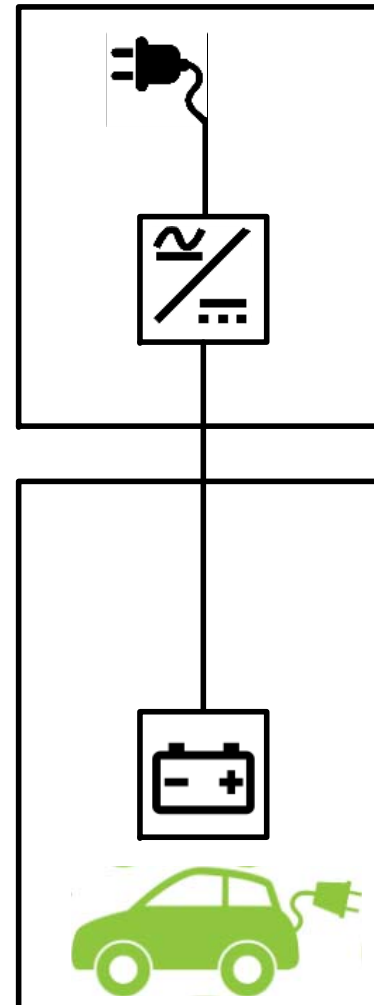
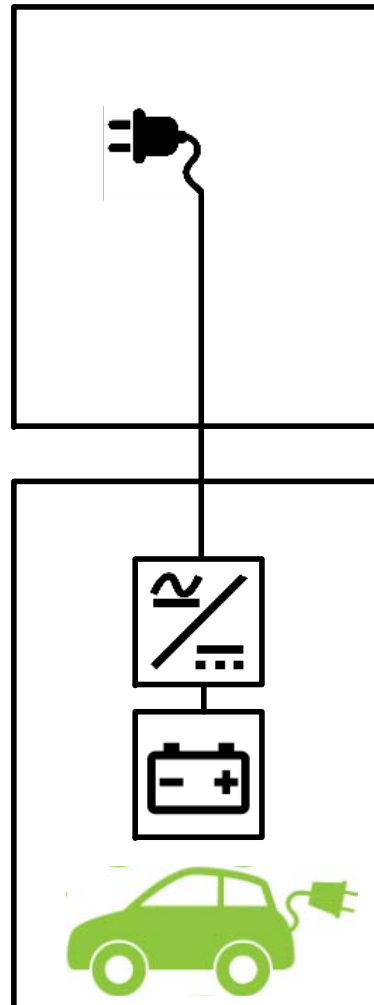
stationär

aufgeteilt

EVSE: AC-Charger

EVSE: DC-Charger

EVSE: ICS



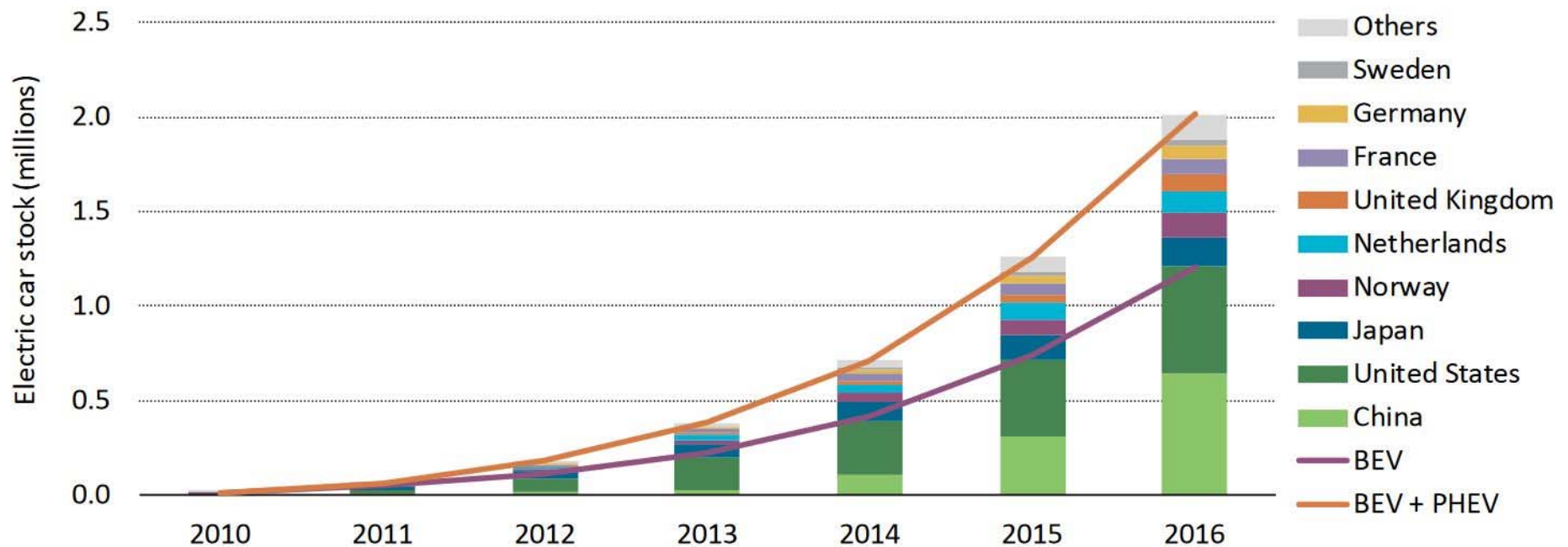
Weltweite Verbreitung der EVs

2016 zwei Millionen erreicht

Ein Drittel plug in Hybrid

Jährliche Zuwachsrate 81% seit 2012 (Durchschnitt)

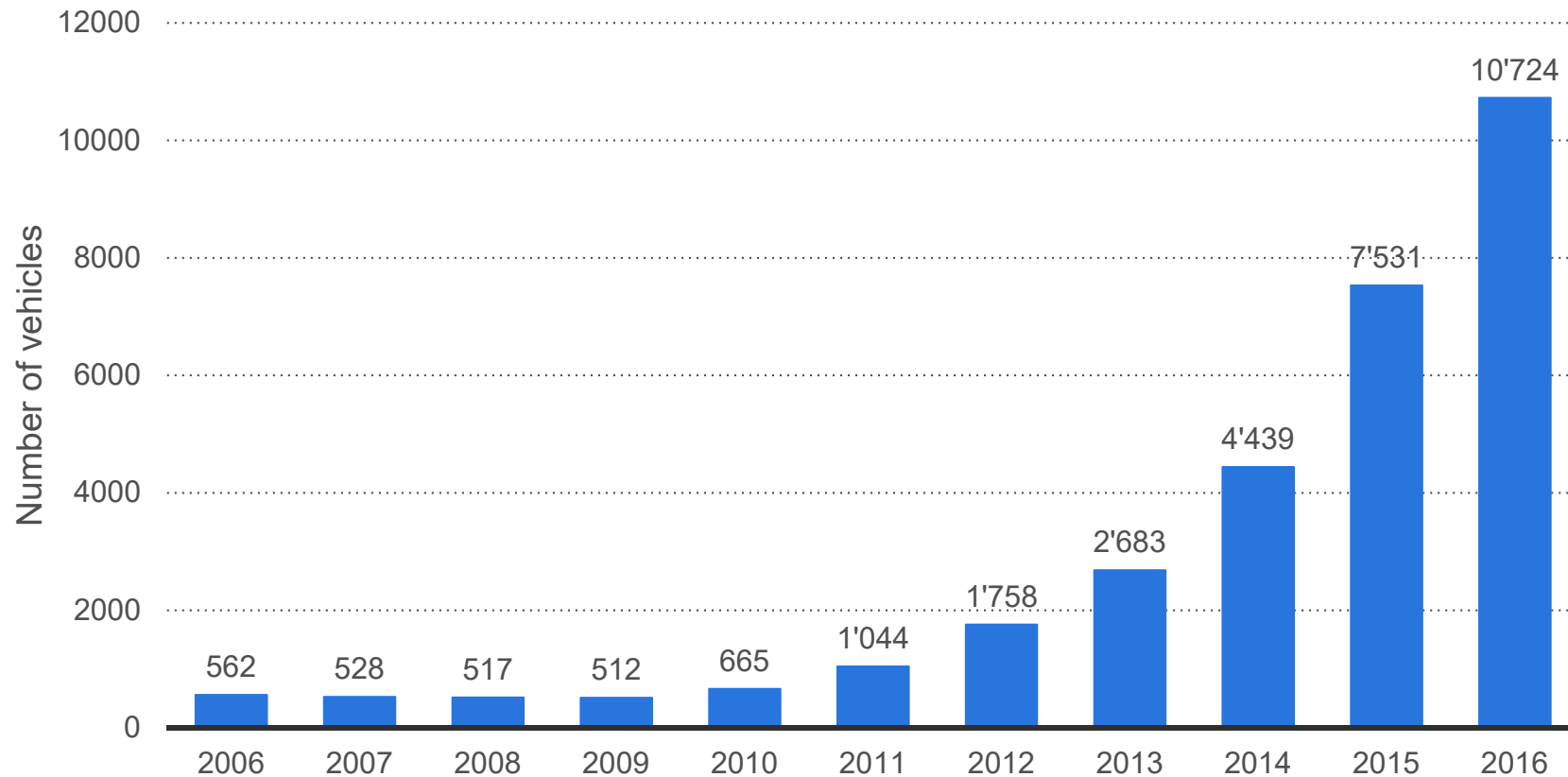
Evolution of the global electric car stock, 2010-16



Quelle: IEA

EVs in der Schweiz

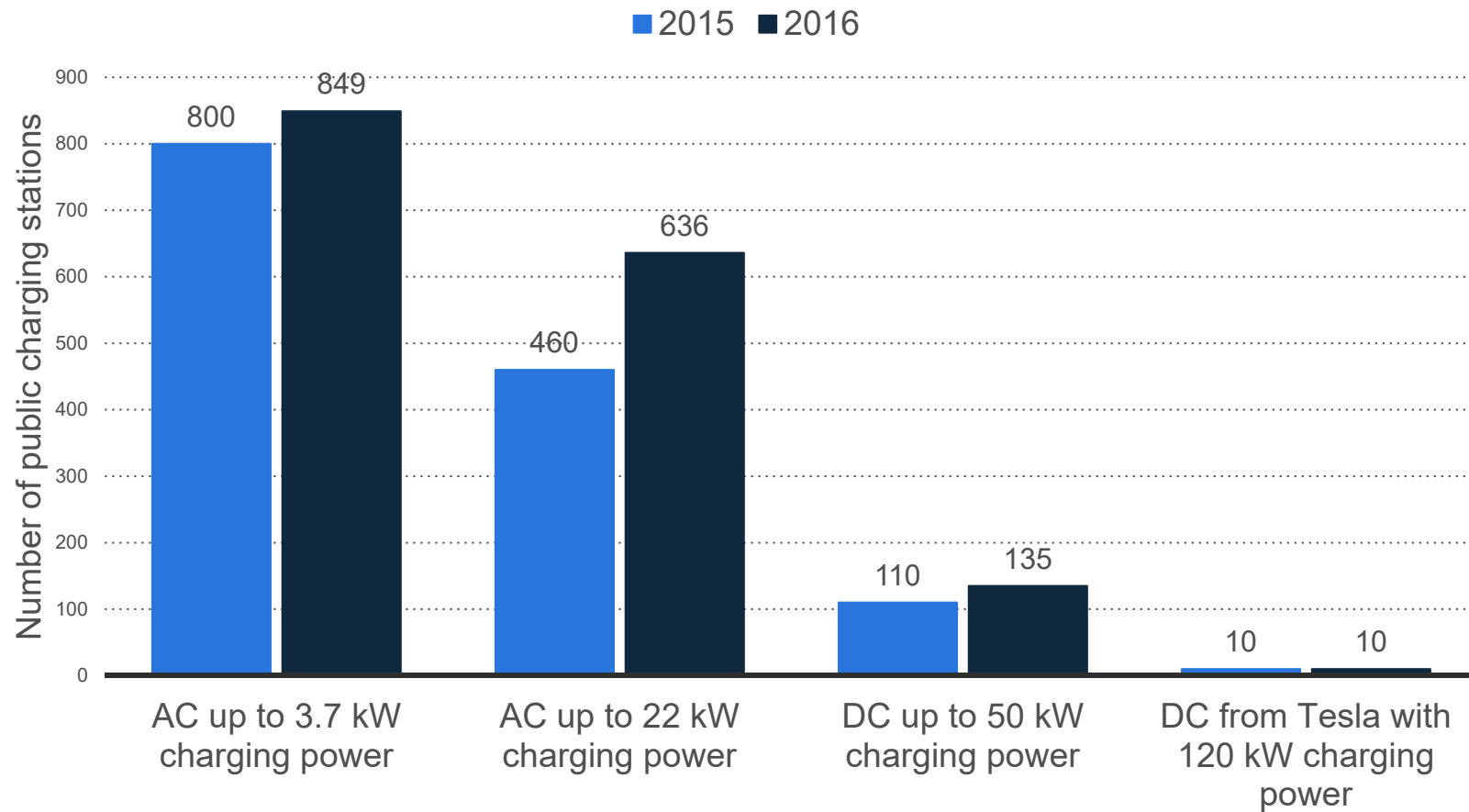
Jährliche Zuwachsrate 57% seit 2012 (Durchschnitt)



Quelle: <http://de.statistica.com>

Öffentliche Ladestationen - CH

Alles kabelgebundene Systeme



Induktives Laden nach Kategorie

Statisches Laden

Das Fahrzeug ist parkiert

Der Fahrer ist nicht im Fahrzeug

Beispiele:

- Zuhause
- Beim Arbeitgeber
- Im Einkaufszentrum

Stationäres Laden

Das Fahrzeug steht still

Der Fahrer bleibt im Fahrzeug

Beispiele:

- Verkehrsampeln
- Bushaltestellen
- Lieferwagen

Dynamisches Laden

Das Fahrzeug bewegt sich

Der Fahrer ist im Fahrzeug

Beispiele:

- Induktive Landstrasse
- Schienenfahrzeuge

Dynamisches Laden



Teststrecke in Versailles (Vedecom / Qualcomm)

Ladeleistung: 2 Empfänger mit je 11kW (zur Glättung)

Fahrgeschwindigkeit bis 100km/h

Dynamisches Laden



Teststrecke des Korea Railroad Research Institute KRRRI

Ladeleistung bis zu 1 MW erfolgreich getestet (bei 60kHz)

Kommerzielle Einführung in den nächsten Jahren geplant

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit