



NTB  
INTERSTATE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
OF TECHNOLOGY BUCHS



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

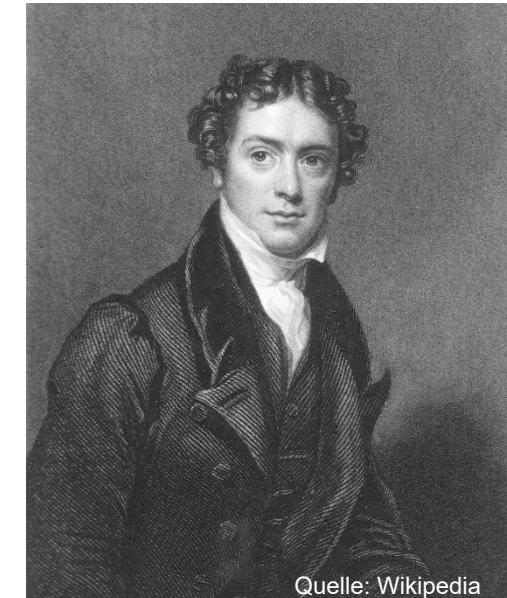
Näher dran  
am System  
der Technik  
der Zukunft

# Übersicht

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

# Historisches

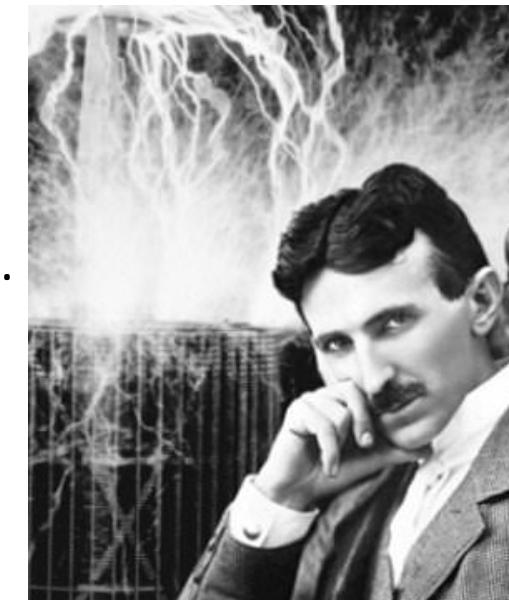
- Michael Faraday – Entdecker der elektromagnetischen Induktion
- 1822 erste Versuche
  - Dokumentiert in Notizbuch «Convert Magnetism into Electricity»
  - Diese Versuche waren nicht erfolgreich
- 1831 Durchbruch
  - Erste dokumentierte Experimente
  - Versuch mit Stabmagnet und Drahtwendel
  - Einfaches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



Quelle: Wikipedia

# 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



# Historisches

## 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

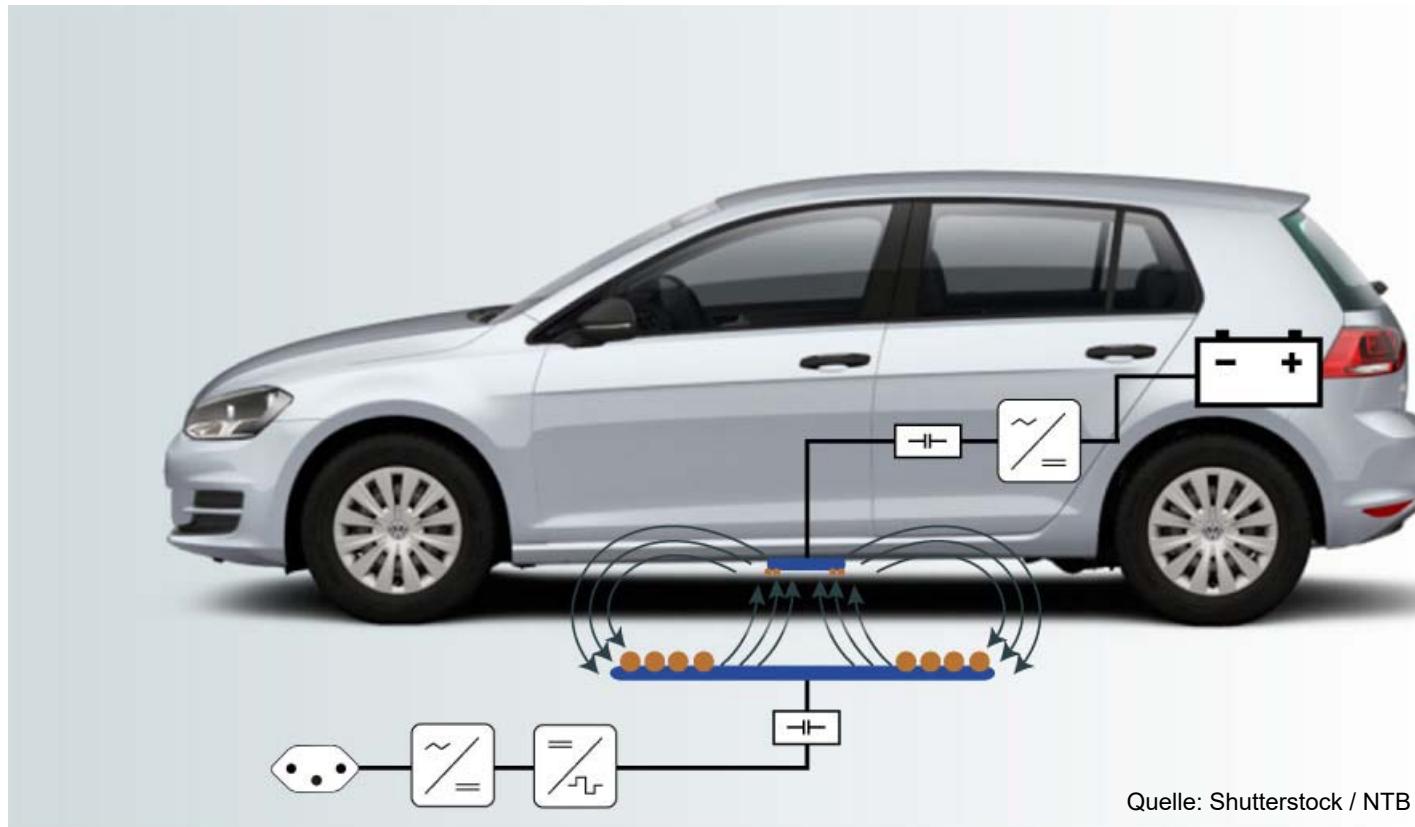




**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

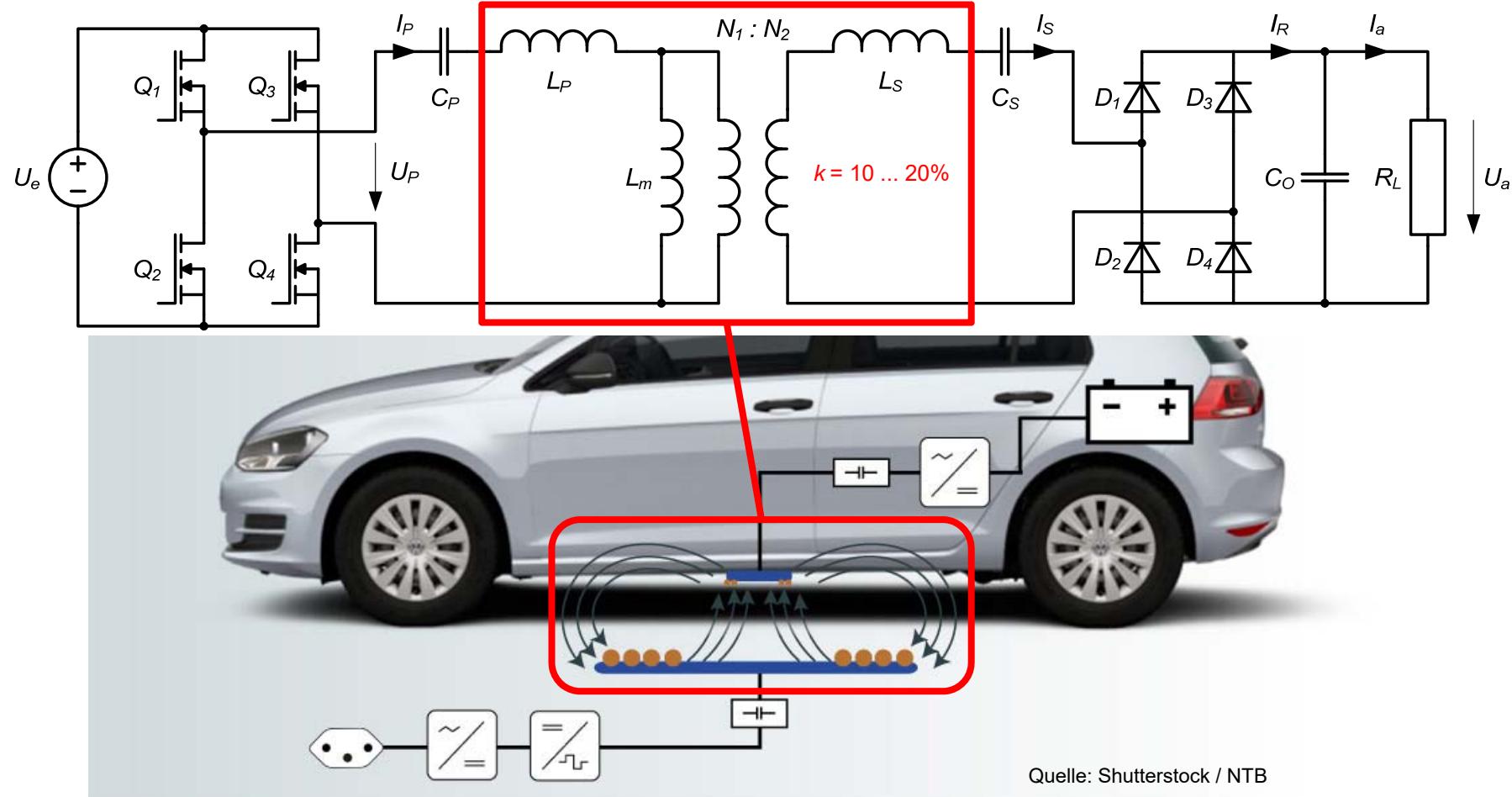
# Wireless Power Transfer Prinzip



Quelle: Shutterstock / NTB

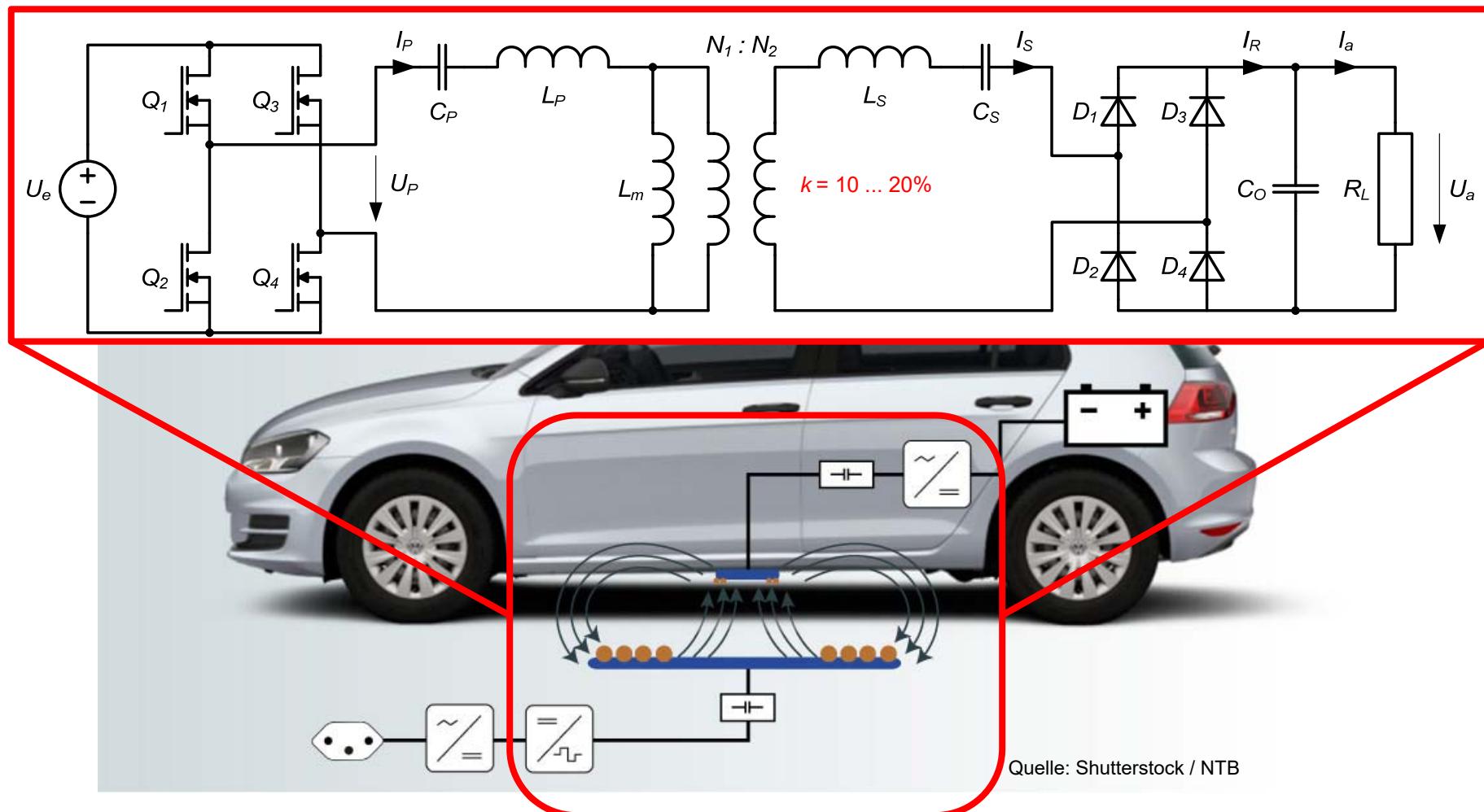


# Wireless Power Transfer Prinzip



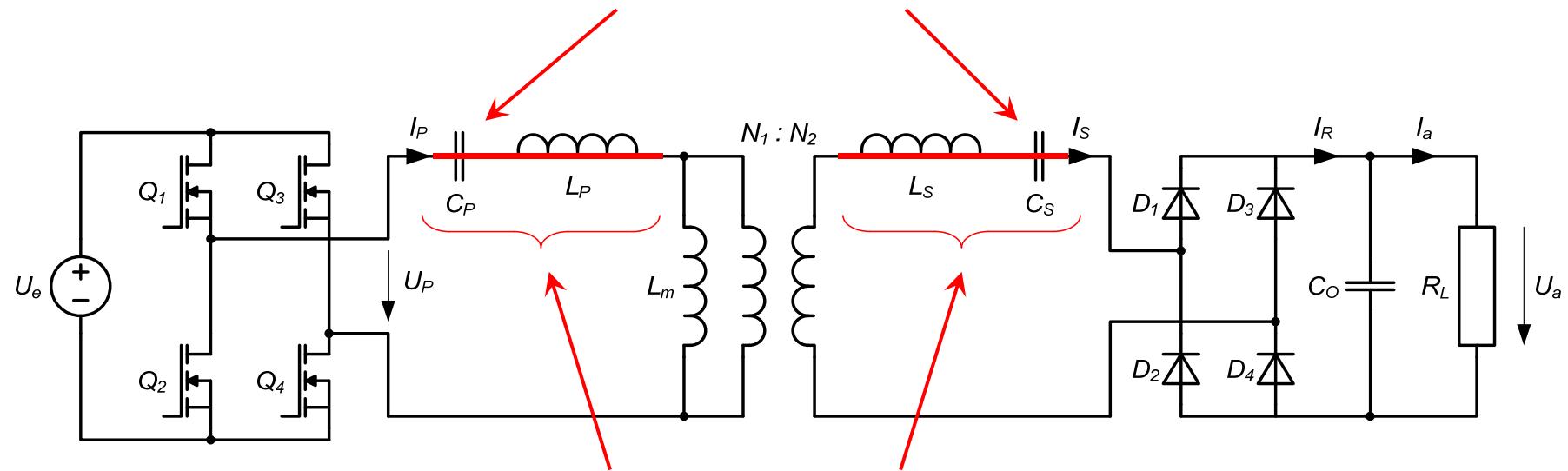


# Wireless Power Transfer Prinzip



# Serie-Kompensation

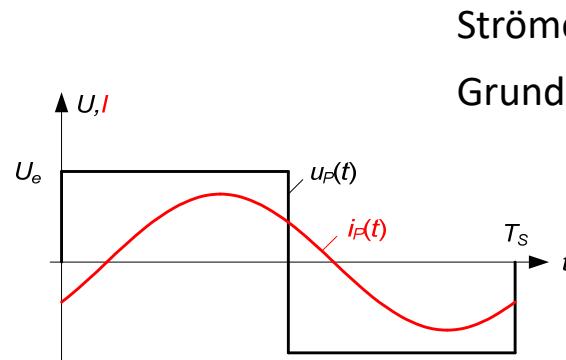
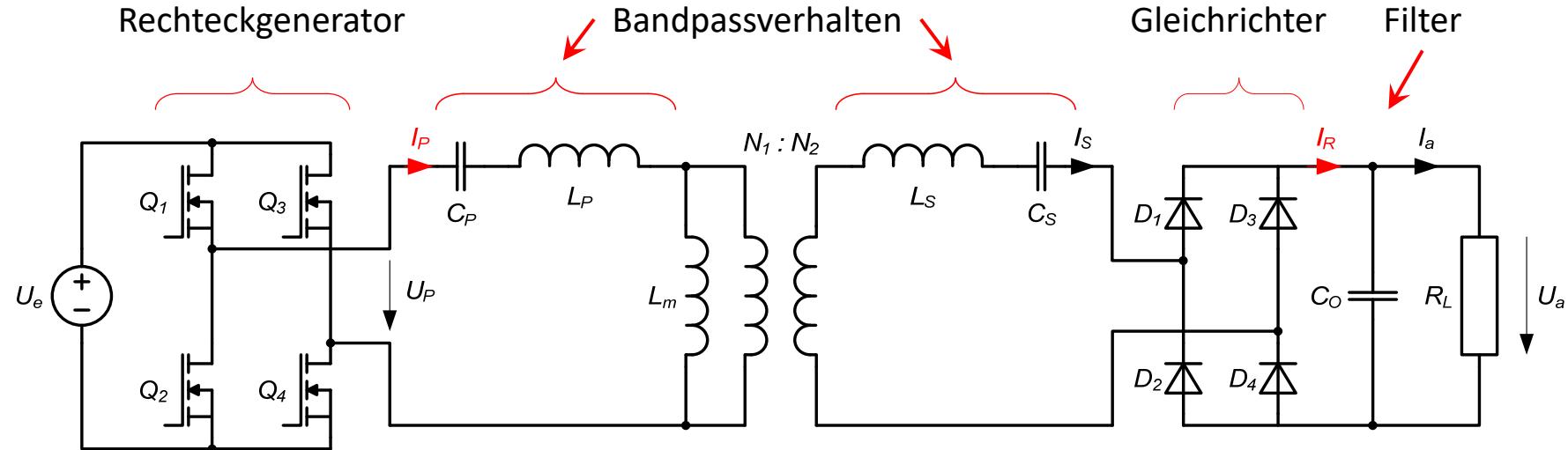
Serie-Kompensation der Streuinduktivitäten



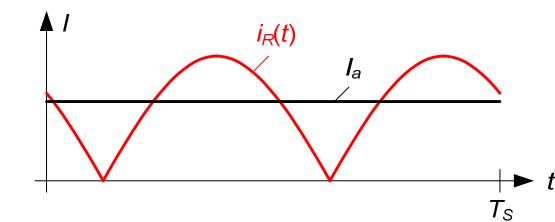
Bei Resonanzfrequenz wird Impedanz null

- Trifft nur für eine bestimmte Geometrie-Konstellation bei einer bestimmten Frequenz zu.
- Variation des Luftspalts (Bodenfreiheit) und lateraler Versatz (ungenaues 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



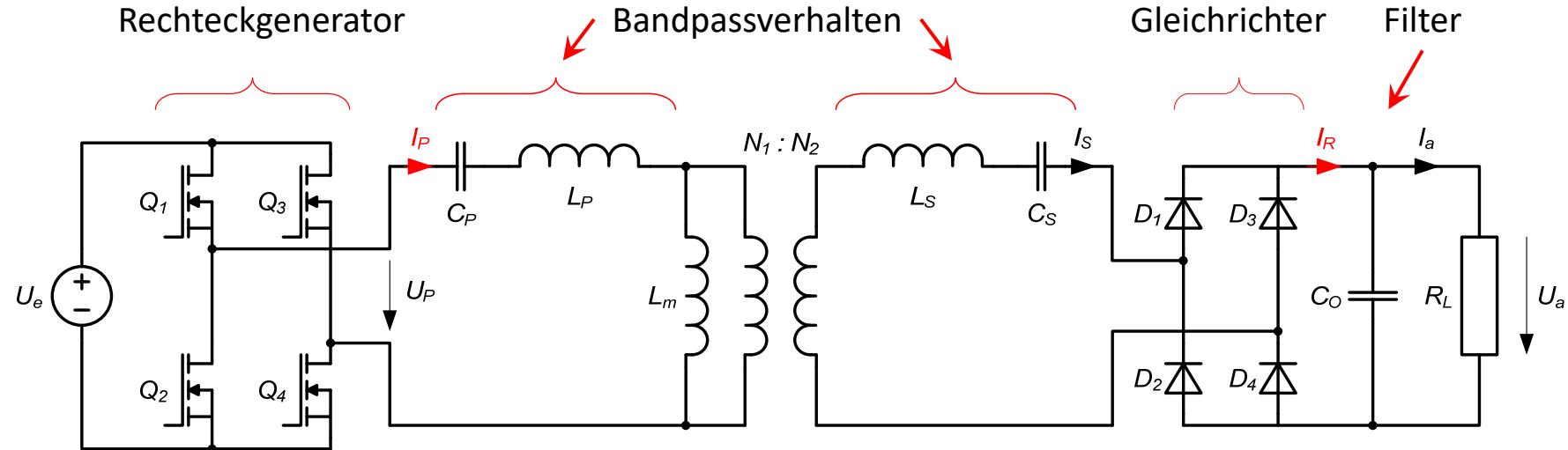
$I_a$  entspricht Mittelwert von  $I_R$

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

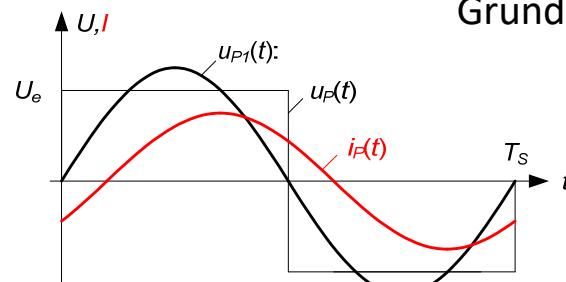
Leistung  $P$

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

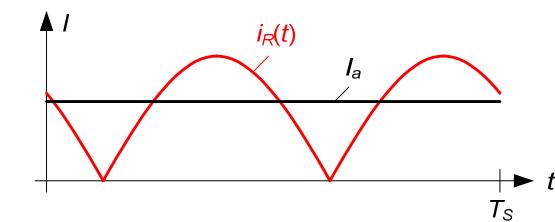
# Analytische Beschreibung



Ströme im Koppler werden sinusförmig  
Grundwelle ist hauptsächlich aktiv



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



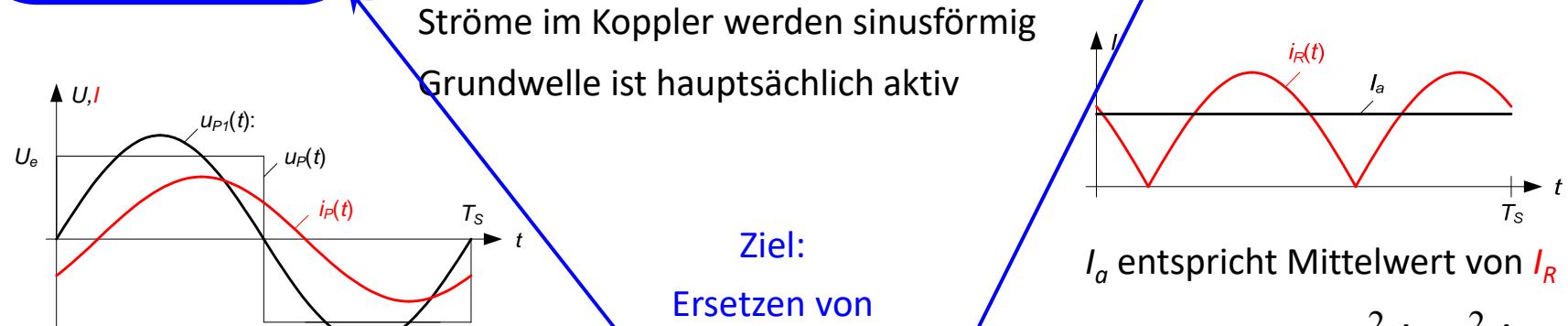
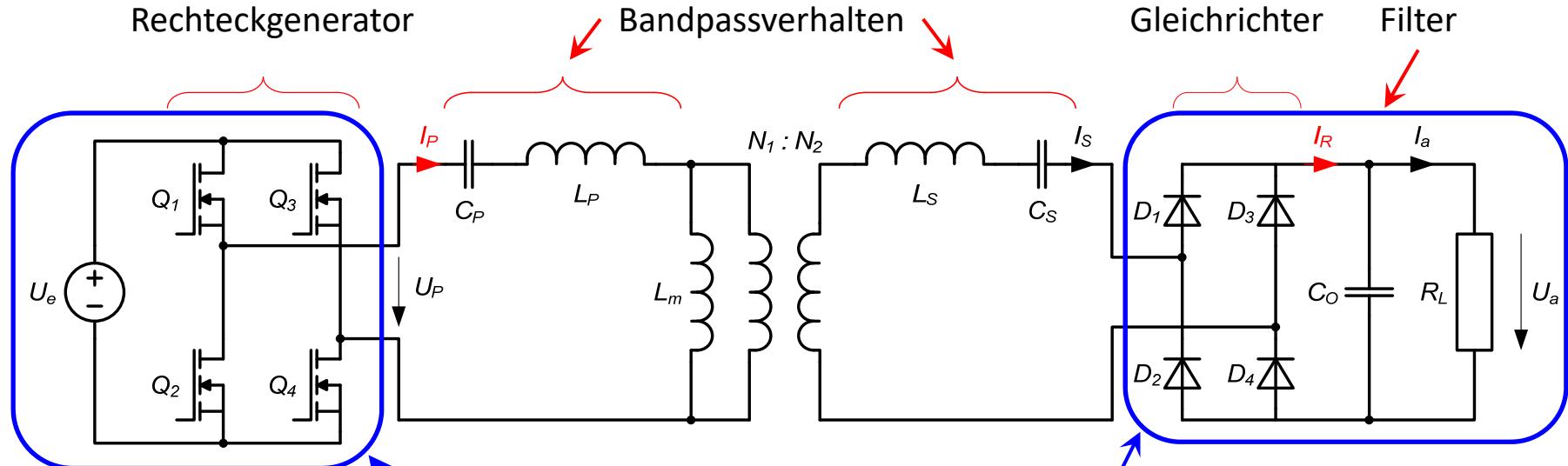
$I_a$  entspricht Mittelwert von  $i_R$

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

Leistung  $P$

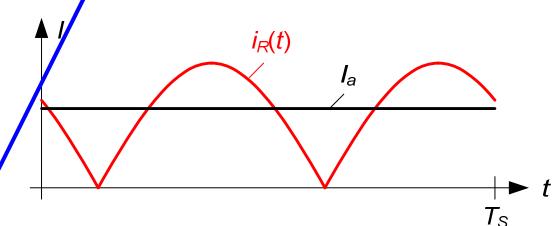
$$P = I_a^2 R_L \quad \Rightarrow \quad P = \frac{4}{\pi^2} \hat{I}_S^2 R_L$$

# Analytische Beschreibung



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

Ziel:  
Ersetzen von  
Rechteckgenerator  
Gleichrichter mit Filter



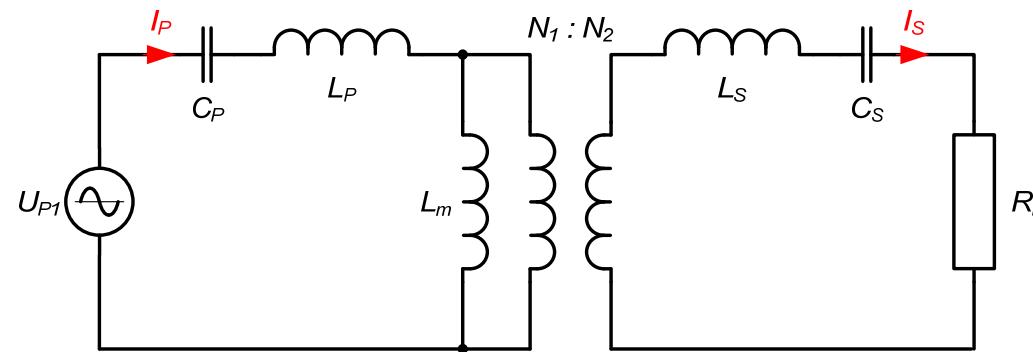
$$I_a = I_{R,AV} = \frac{2}{\pi} \hat{I}_R = \frac{2}{\pi} \hat{I}_S$$

Leistung  $P$

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

# First Harmonic Approximation

Rechteckgenerator  
ersetzt durch Sinusquelle



Gleichrichter, Filter und Last ersetzt  
durch äquivalenten Widerstand  $R_E$

Leistung an  $R_E$

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

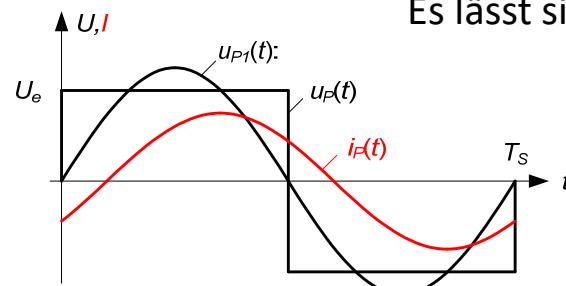
muss identisch bleiben

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

Damit wird  $R_E$

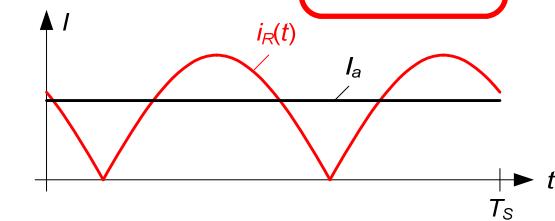
$$R_E = \frac{8}{\pi^2} R_L$$

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



Grundwelle

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



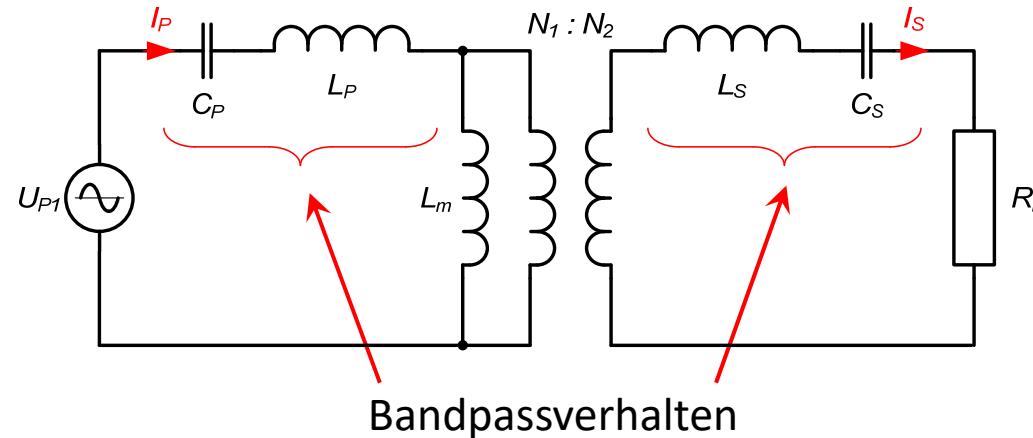
$I_a$  entspricht Mittelwert von  $i_R$

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

Leistung  $P$

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

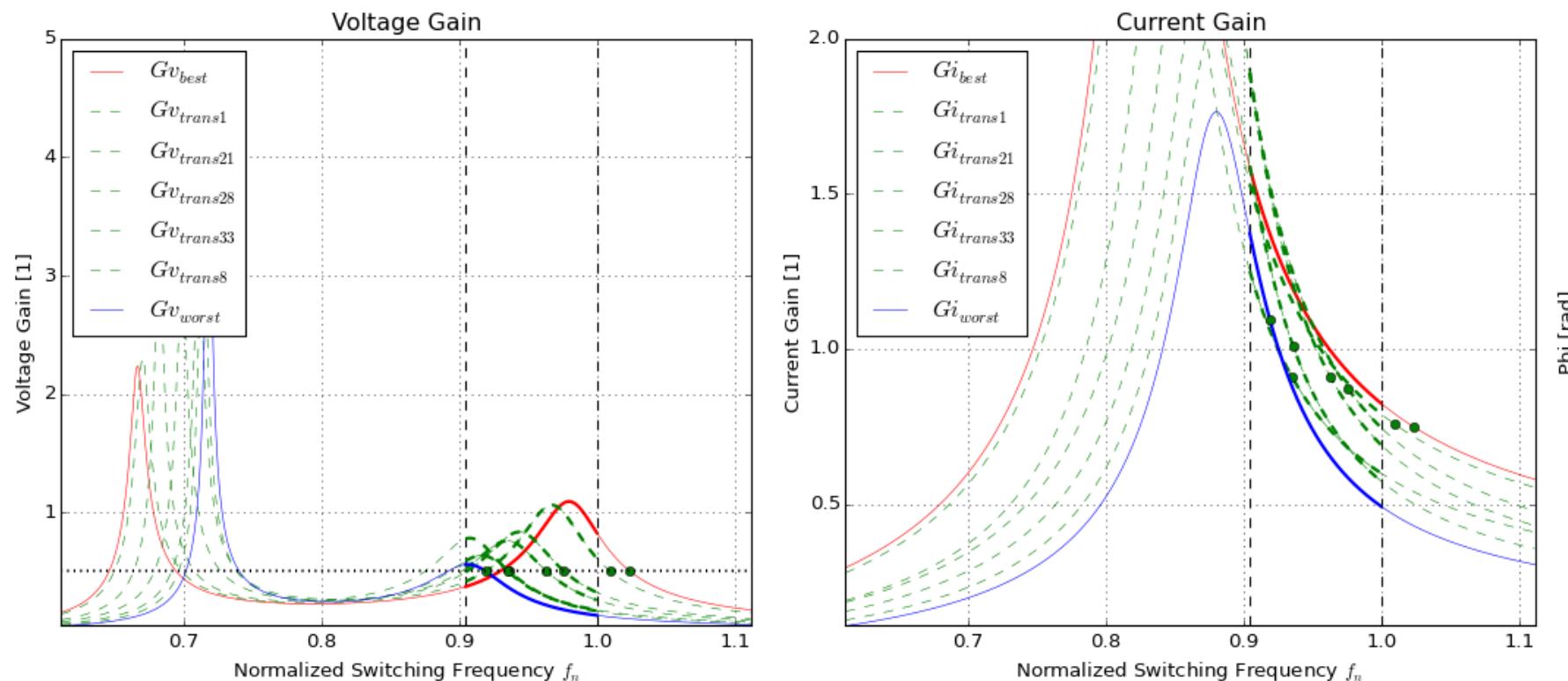
# Vereinfachte Schaltung



- 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

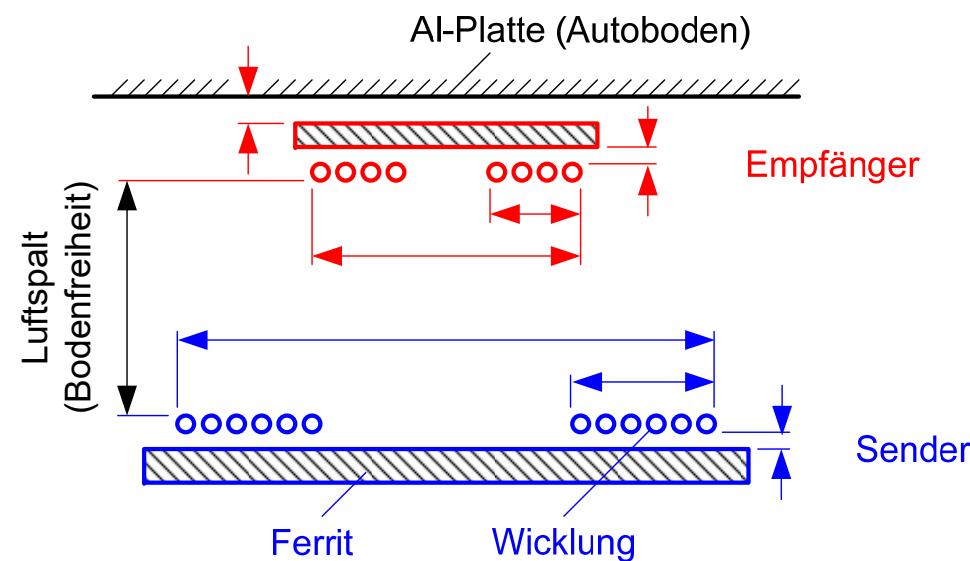
# Beispiel Kurvenscharen

Spannungs- und Stromverstärkung für verschiedene Kopplerpositionen



# Koppler-Design

## Schematischer Aufbau eines Zirkularen Kopplers



Beispiel eines Senders



## Design Constraints

Optimierte 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.

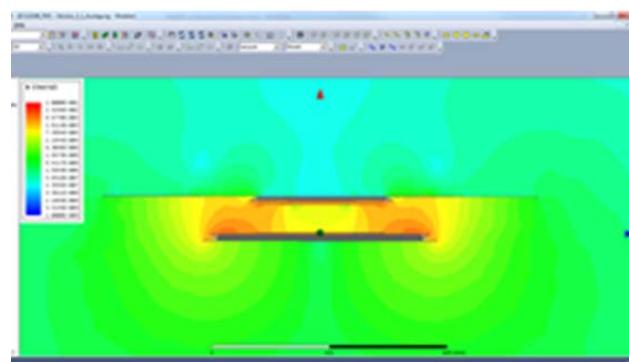
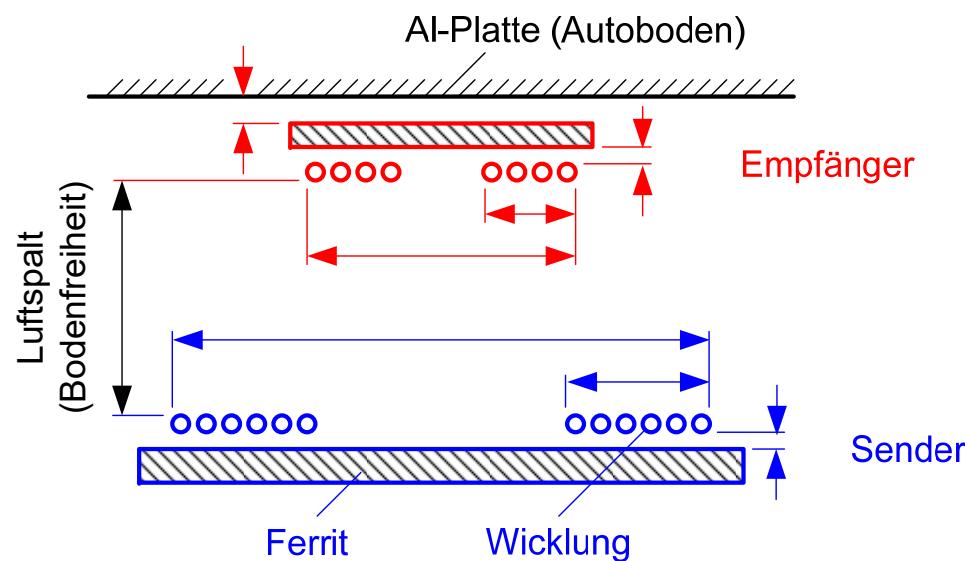
Alle angegebenen Distanzen beeinflussen Verhalten.

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

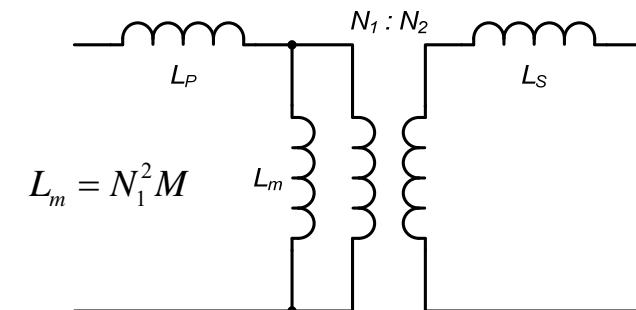
Primäre Eigeninduktivität pro Windung  $L_1$

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

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





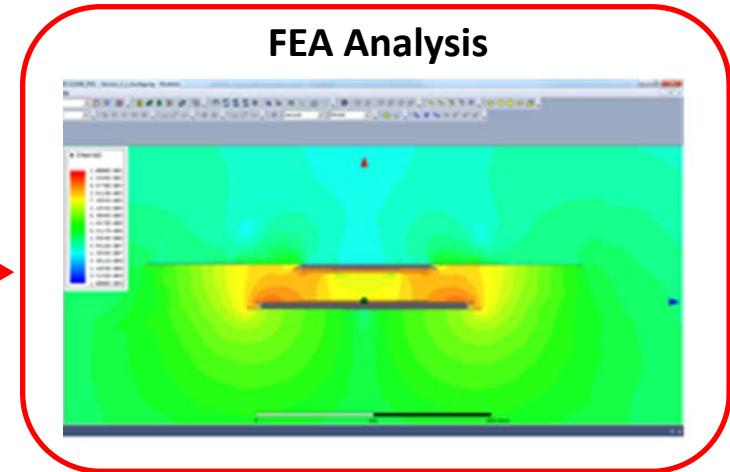
# Designprozess

## Spezifikation

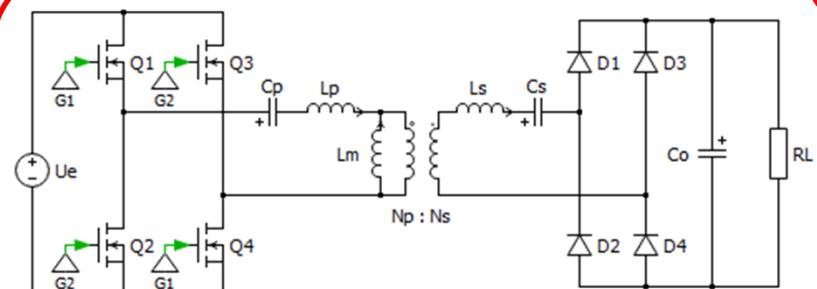
Eingangsspannung	600V
Ausgangsspannung	330 – 450V
Leistung	0 – 22kW
Frequenz	81 – 90kHz
Resonanzspannung	< 3kVrms
Luftspalt	110 – 170mm
Versatz	100 x 150mm

Geometrie

FEA Analysis

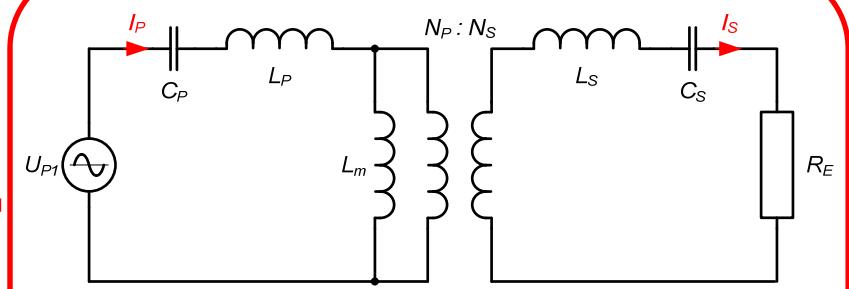


Transformator  
Modell



Simulation

Der exakten Schaltung



Analytische Optimierung

$C_p, C_s, N_p$  und  $N_s$

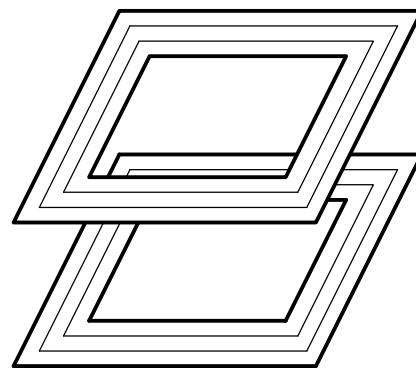


**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Koppler-Topologien

**Circular**

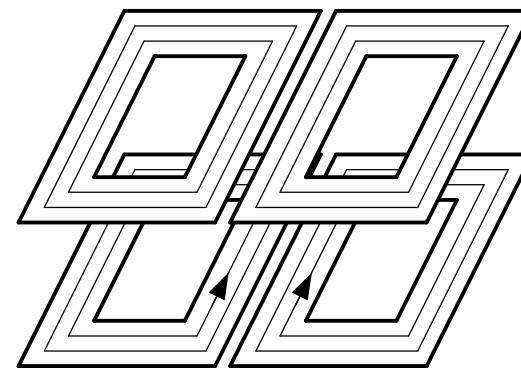


Am häufigsten  
verwendet

Bei allen NTB Designs

Einfacher Aufbau

**Double-D**

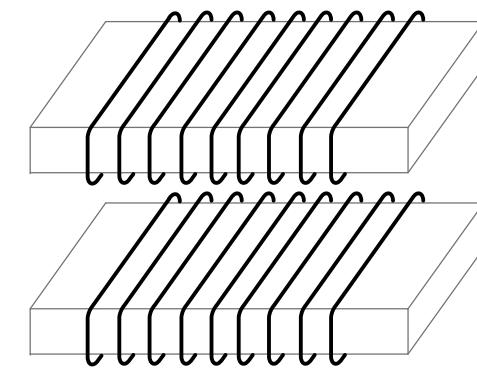


Weniger Streufelder

Verwendung z.B. bei  
Qualcomm

Etwas bessere  
Kopplung

**Solenoid**

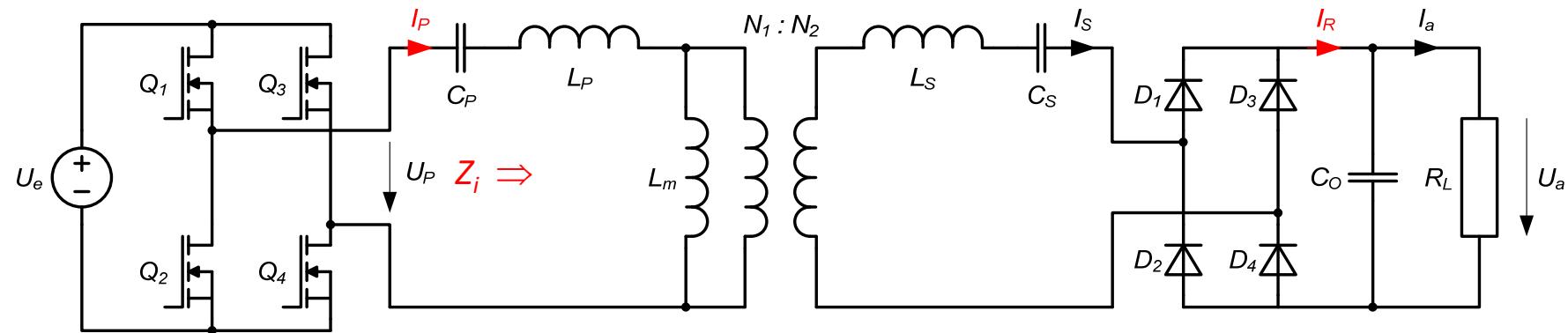


Seltener verwendet

Schlechter bezüglich  
Streufelder

# Soft Switching

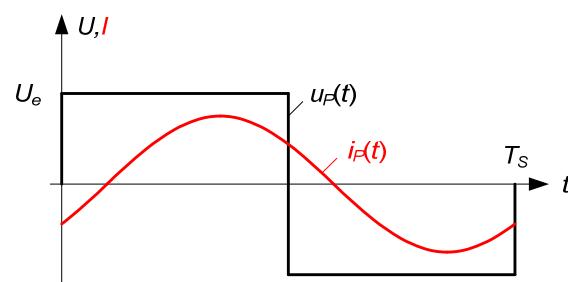
Ursprüngliche Schaltung



Unterresonant

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

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



Überresonant

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

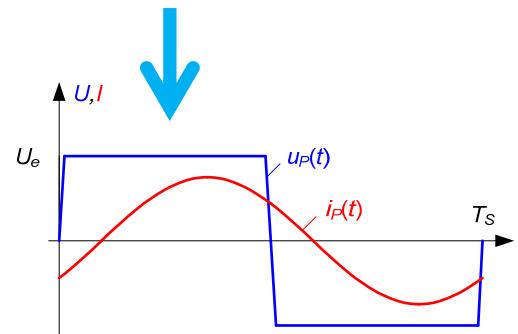
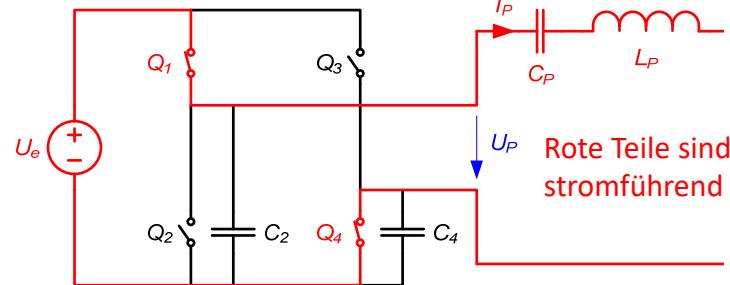
$Z_i = \text{induktiv}$   $\Rightarrow$  Strom ist nacheilend

Überresonanter Fall

Überresonanter Fall erlaubt Soft Switching

# Soft Switching Intervalle

## Positive Halbwelle

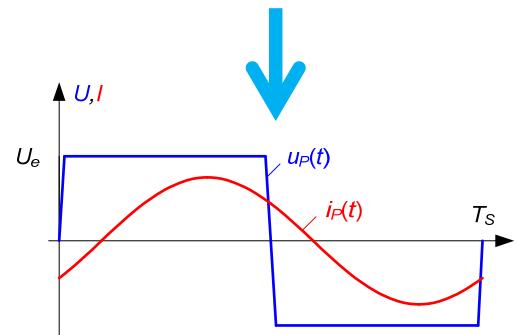
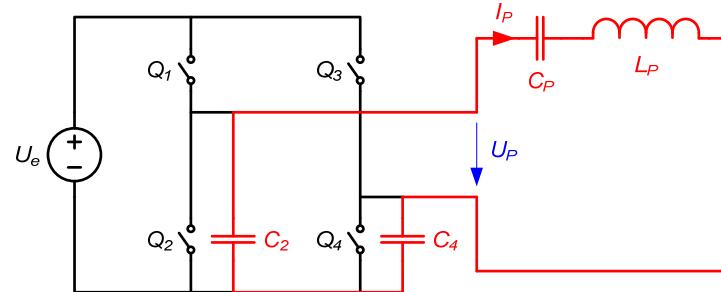


## Positive Halbwelle

$C_2$  geladen,  $C_4$  entladen

Intervall endet wenn  $Q_1$  und  $Q_4$  öffnen.

## Transition-Intervall



## Transition-Intervall

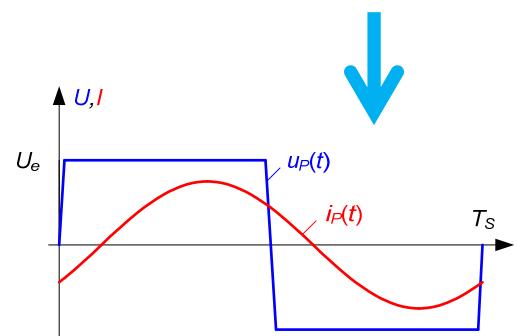
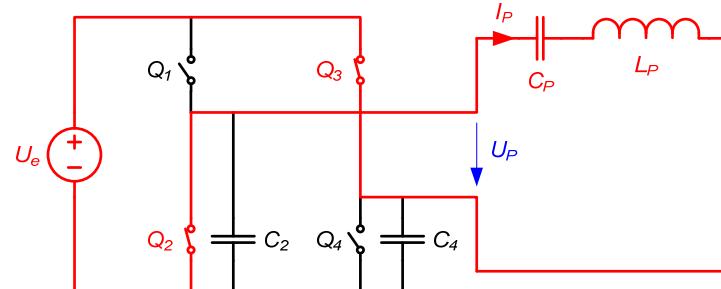
Strom  $i_p$  ist positiv

$C_2$  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  $100\text{kHz}$
  - Vergleich: Erdmagnetfeld in Mitteleuropa ca.  $48\mu\text{T}$  ( $0\text{ Hz}$ )
  - Flussdichte im aktiven Bereich bis ca.  $100\text{mT}$
- 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»

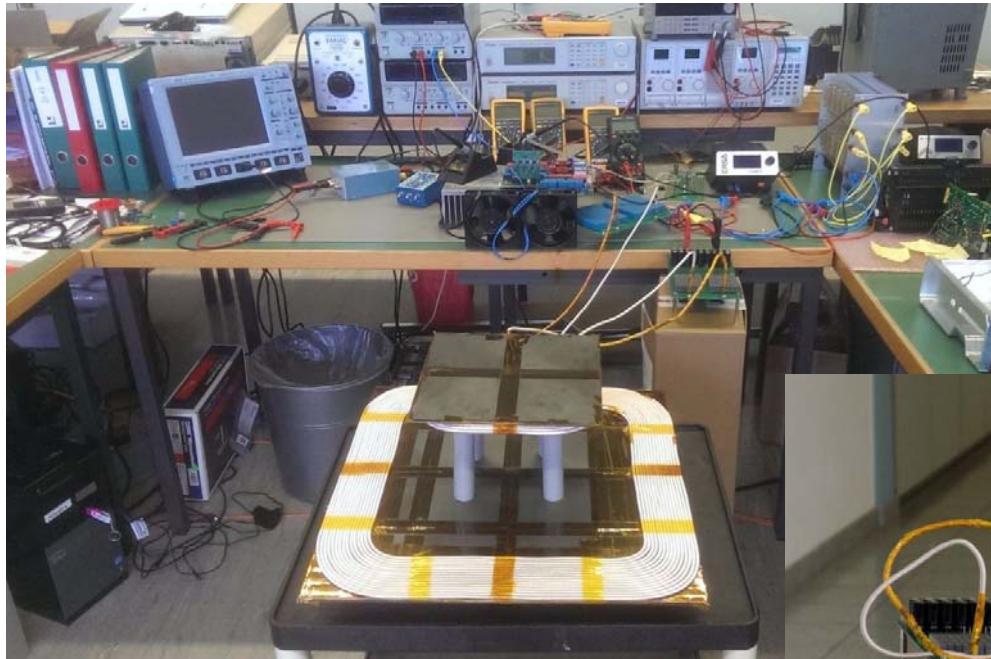




**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# 3.5kW Funktionsmuster



Sender: 48 x 48 cm

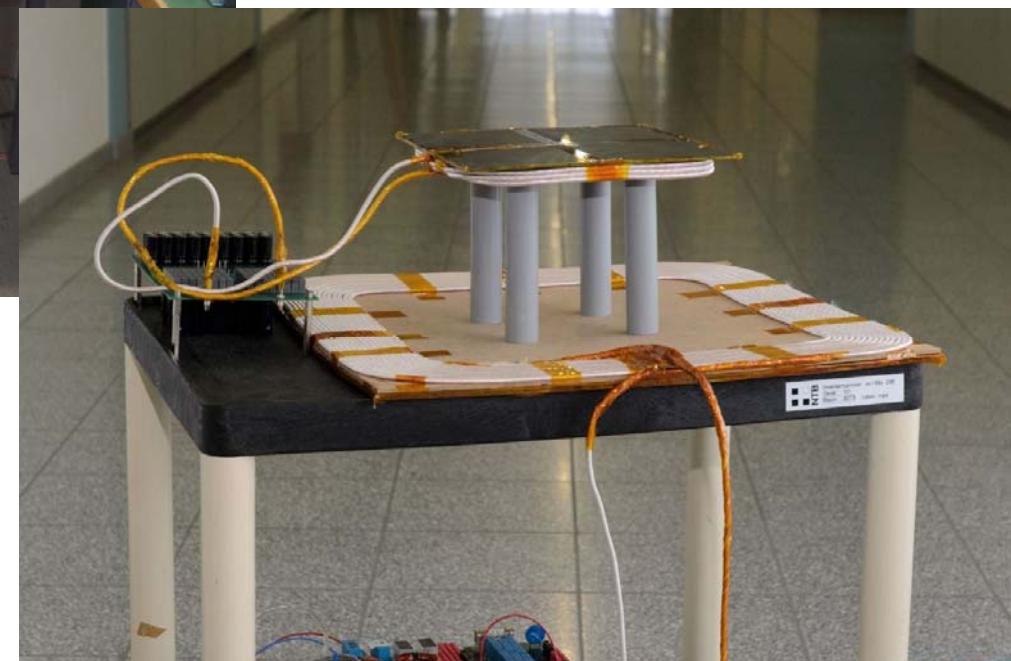
Empfänger: 24 x 24cm

Luftspalt: 50 – 160mm

x-y Versatz: 100 / 100m

Eingangsspannung: 400V

Ausgangsspannung: 310 - 410V



# 3.5kW Wirkungsgrad

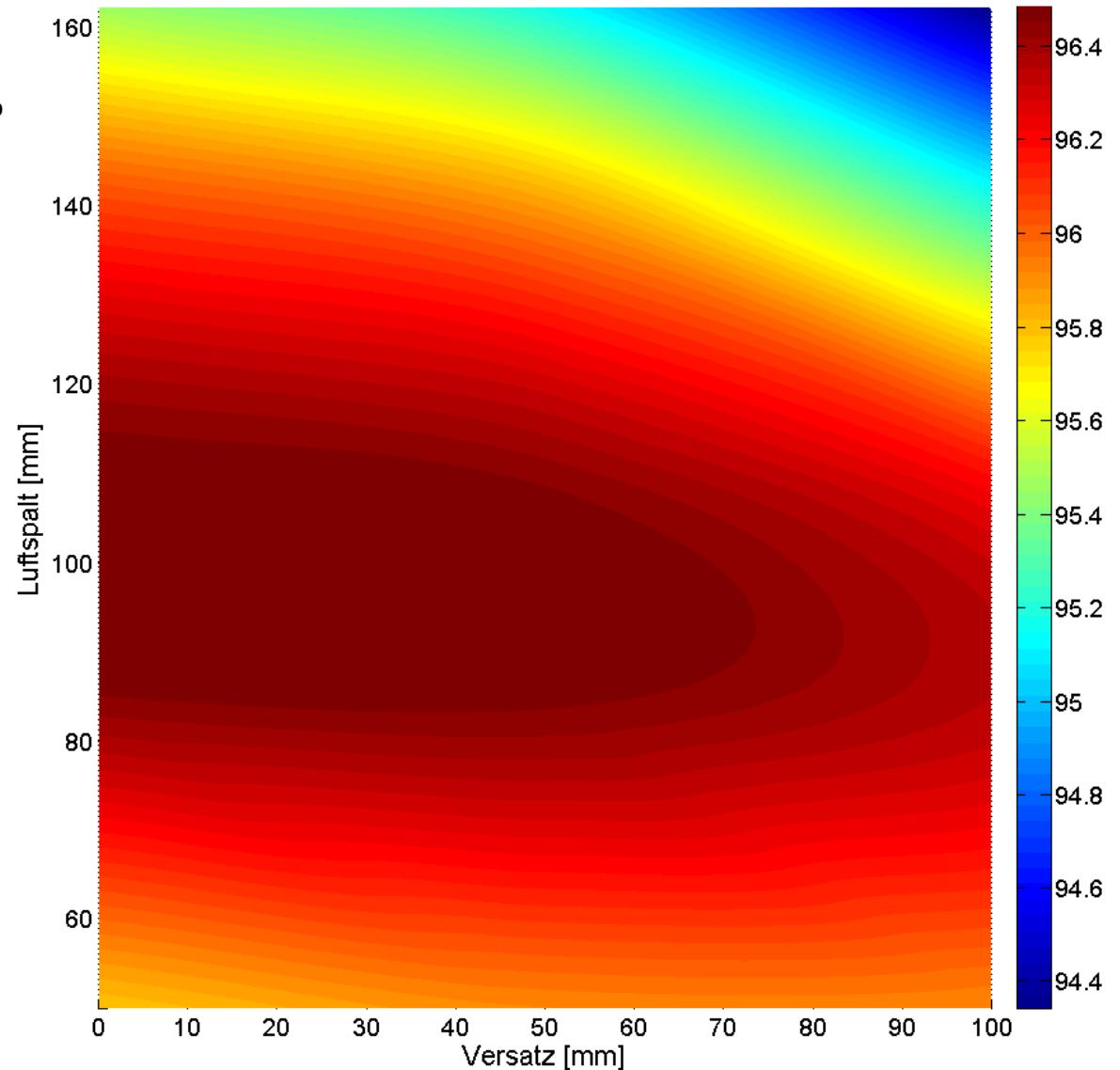
## **Wirkungsgrad 94.4 – 96.4%**

## Abhangig von

- Luftspalt
  - Versatz

Gemessen zwischen  
400Vdc Eingang und  
400Vdc Ausgang

## Ohne Aluminiumblech (Fahrzeugkarosserie)





**NTB**

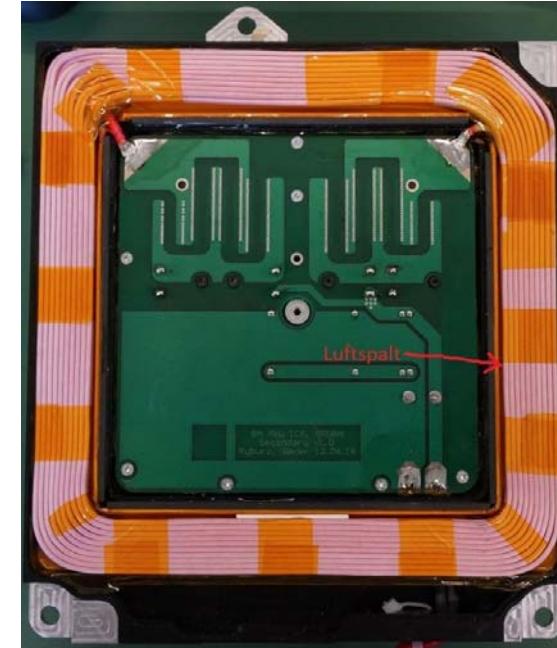
Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# 7.2kW Funktionsmuster

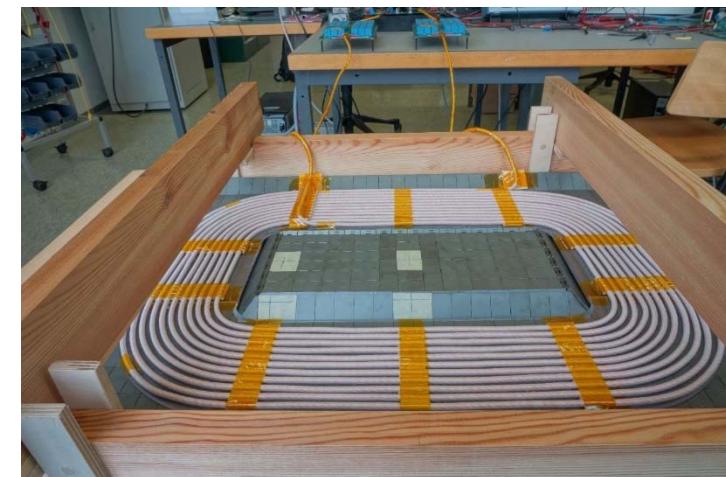
Testaufbau



Empfänger



Sender



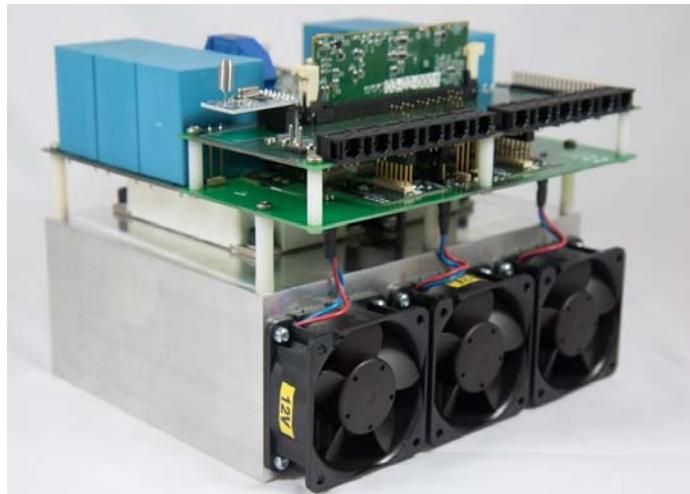


**NTB**

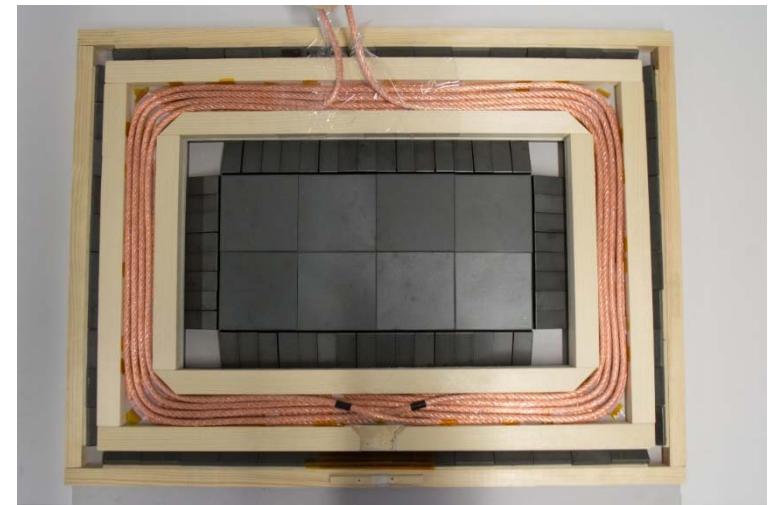
Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# 11kW und 22kW Prototypen

Primärseitige Leistungselektronik



Sender



Teststand



Empfänger





**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Industrielle Produkte

BRUSA Elektronik AG

3.5kW



Plugless, Evatran Group

3.5kW



Bombardier, Primove

3.5kW, 7.2kW und 22kW

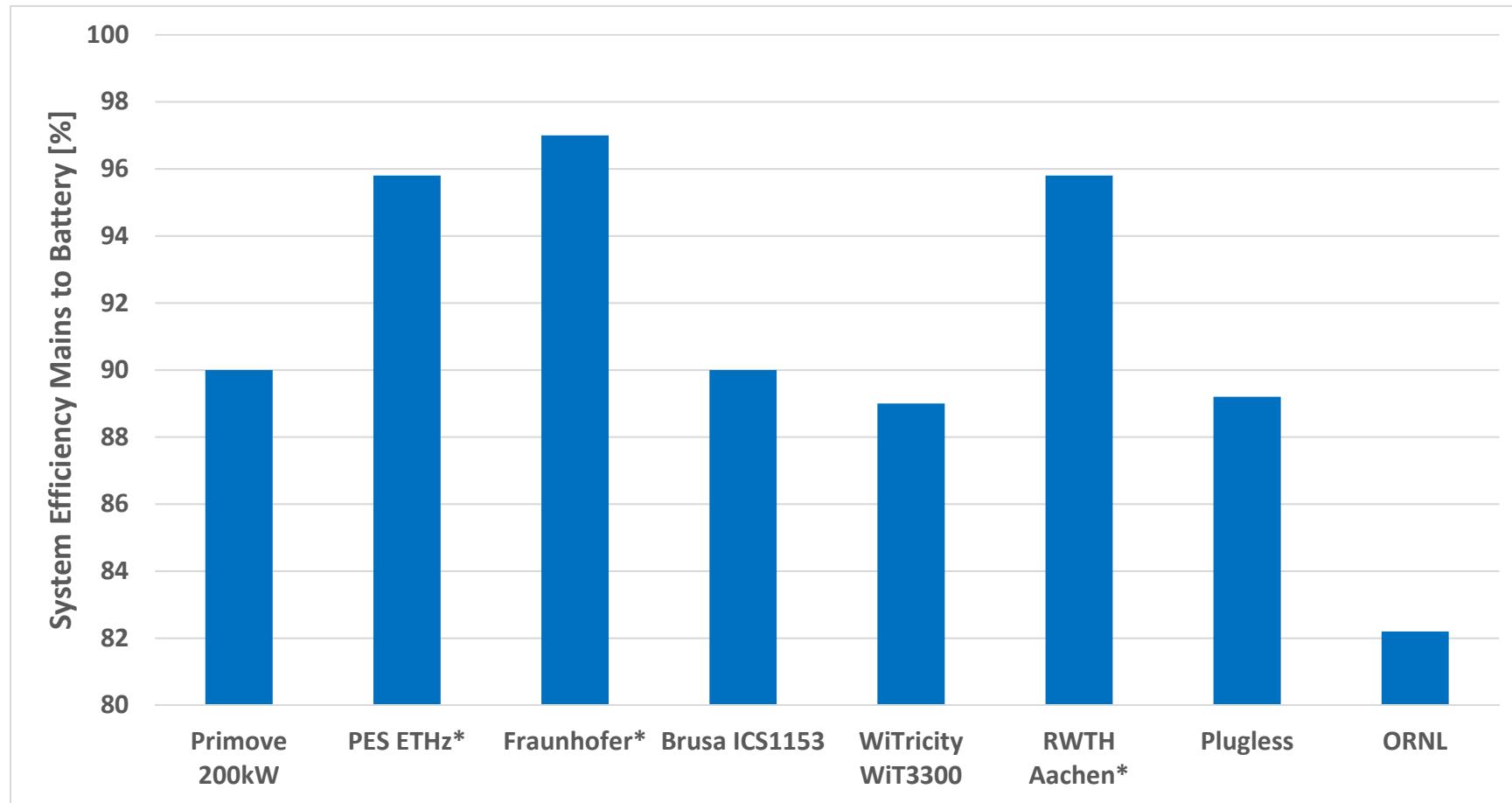


Qualcomm, Halo, 3.3kW bis 22kW



# Wirkungsgradvergleich

Gemäss Angaben der Hersteller, bzw. Institute



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

# Konduktiv vs. induktiv

Leistungselektronik

auf Fahrzeug

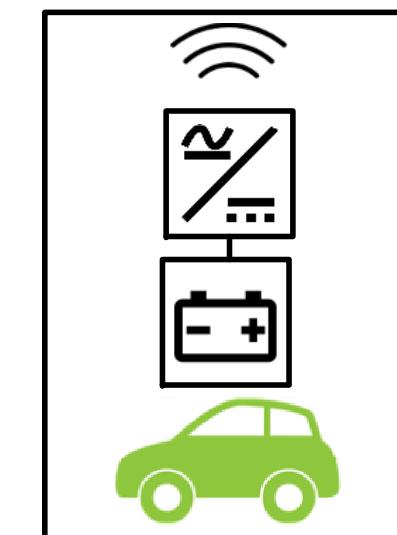
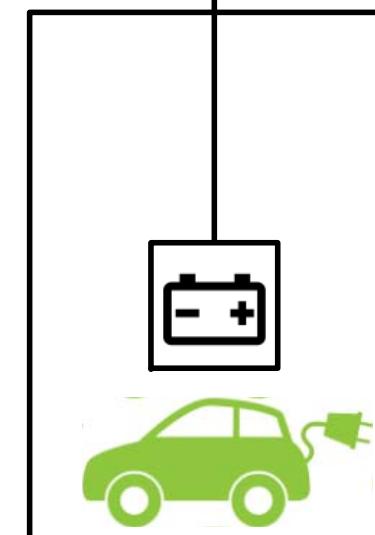
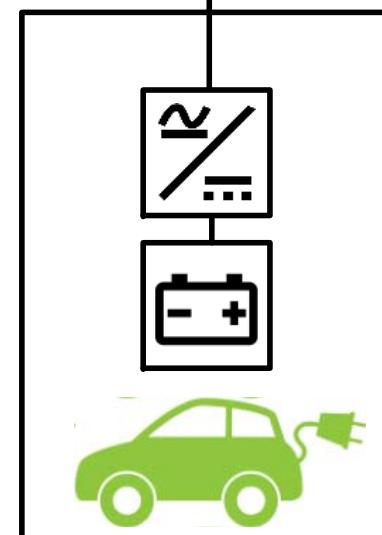
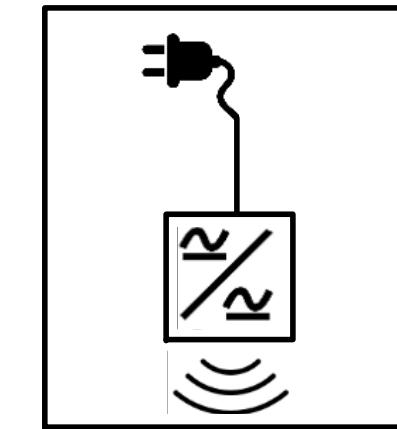
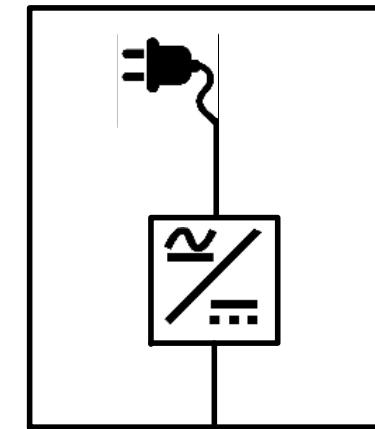
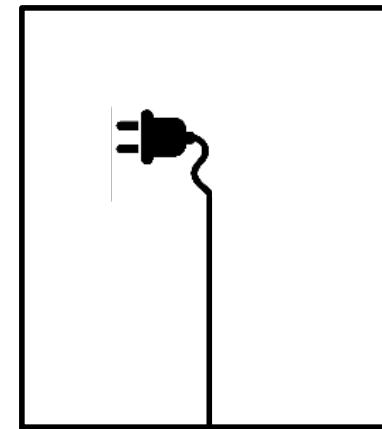
stationär

aufgeteilt

EVSE: AC-Charger

EVSE: DC-Charger

EVSE: ICS

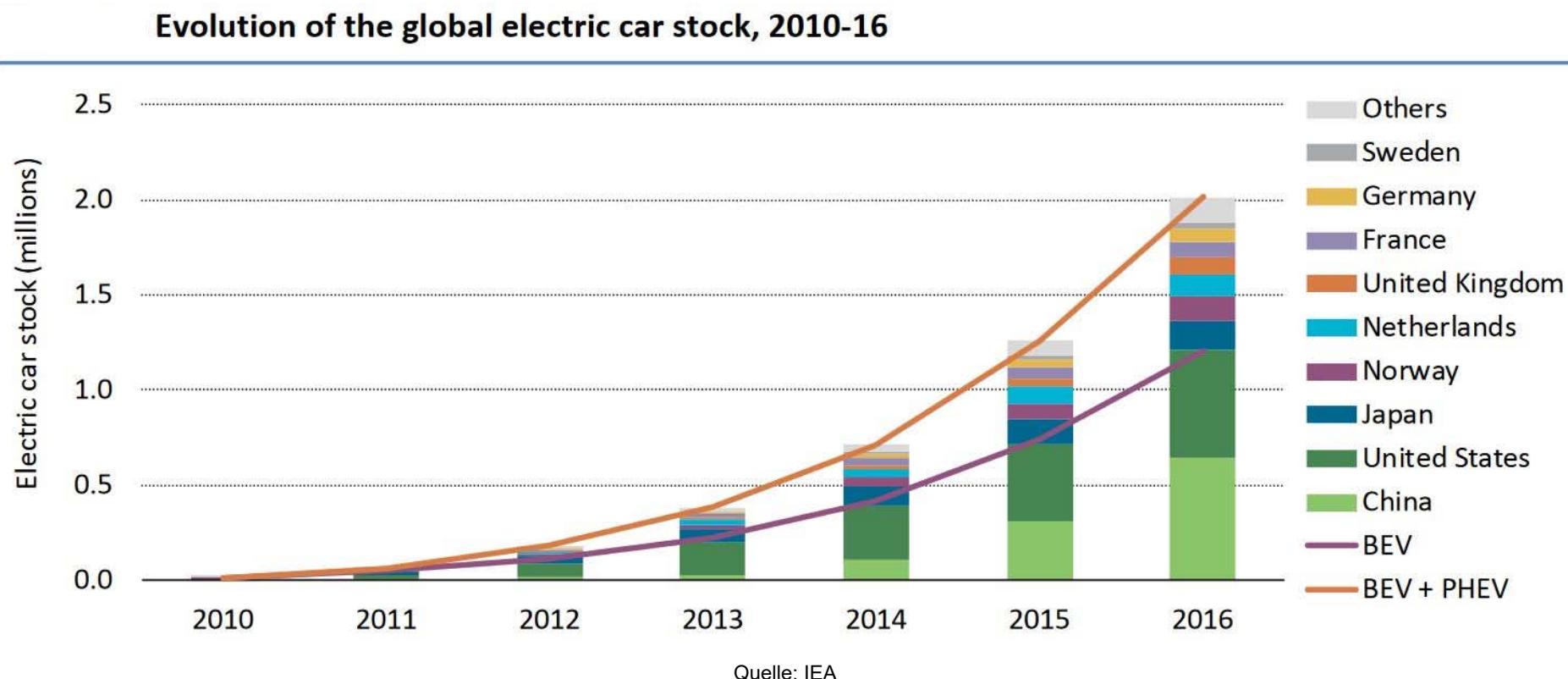


# Weltweite Verbreitung der EVs

2016 zwei Millionen erreicht

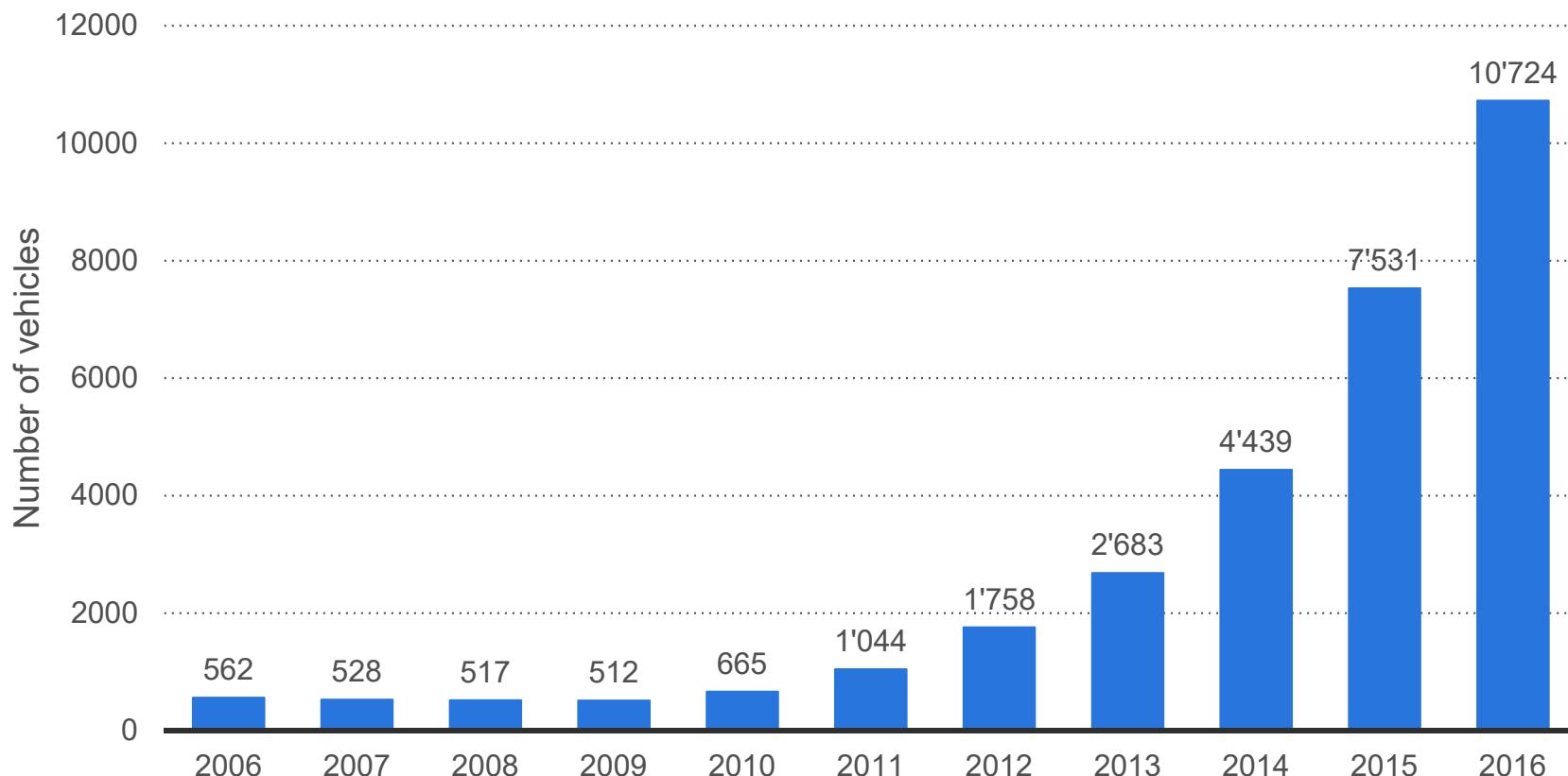
Ein Drittel plug in Hybrid

Jährliche Zuwachsrate 81% seit 2012 (Durchschnitt)



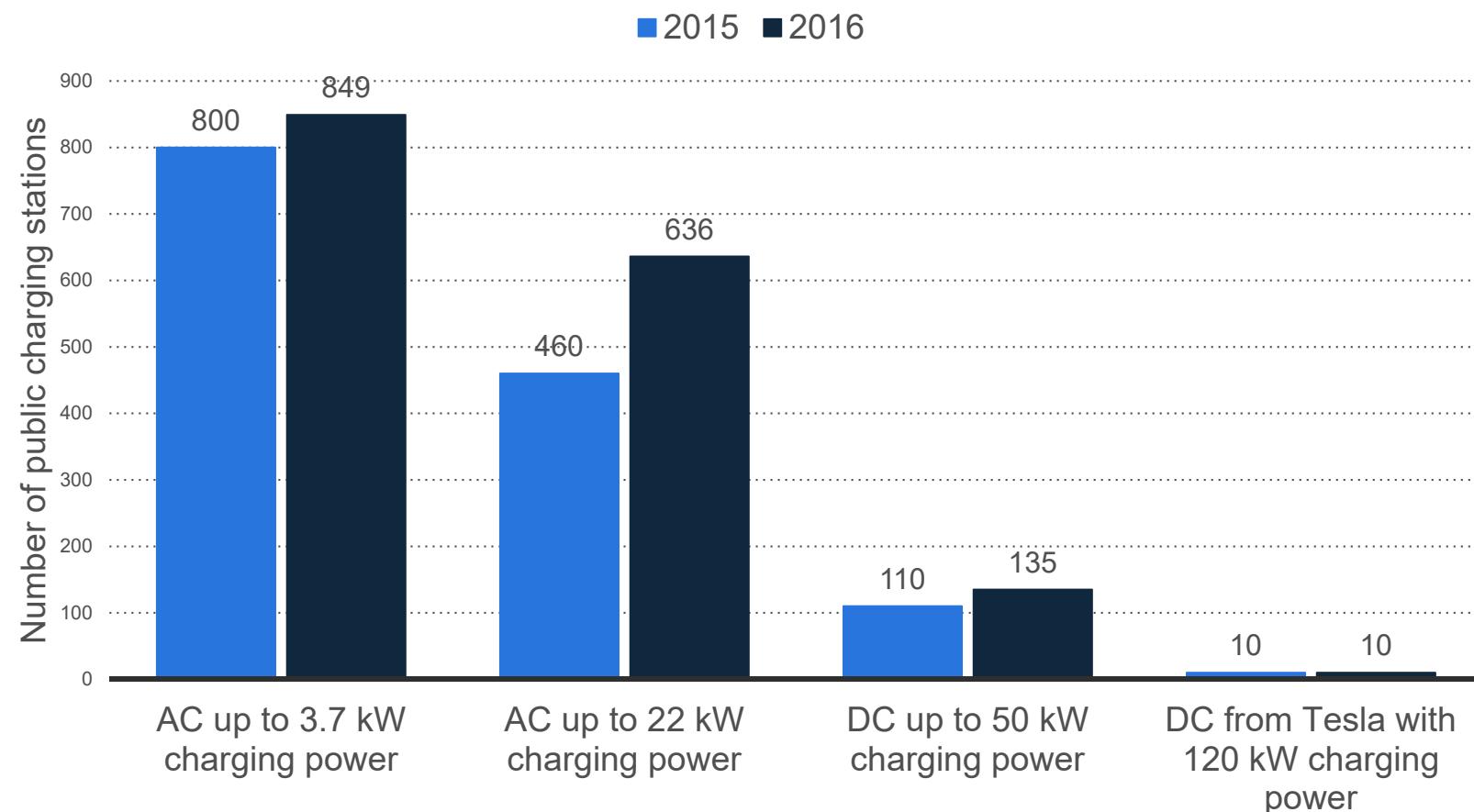
# EVs in der Schweiz

Jährliche Zuwachsrate 57% seit 2012 (Durchschnitt)



# 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



**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs

FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Dynamisches Laden



Quelle: connect.eventia.com

Teststrecke in Versailles (Vedecom / Qualcomm)

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

Fahrgeschwindigkeit bis 100km/h



**NTB**

Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Dynamisches Laden



Teststrecke des Korea Railroad Research Institute KRRI

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

Kommerzielle Einführung in den nächsten Jahren geplant



**NTB**



Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit