

[www.caenels.com](http://www.caenels.com)



PTB-Seminar

„Neue Messverfahren in der elektrischen Messtechnik“

Präsentation

**CAENels – 0-FLUCS-Stromwandler  
und ihre Anwendung**

Joachim Theiner

*Business Development Manager*

*D-A-CH + Westeuropa*

17.05.2017



- Historie von CAEN und CAENels
- Historie der o-FLUCS-Technologie und Vergleich zu weiteren Strommessverfahren
  - Beschreibung der CAENels o-FLUCS-Technologie
- Kennzahlen der CAENels DCCTs und der CAENels CT-BOX
  - Beispiele technischer Anwendungsfälle
  - Varianten und Preise
  - Referenzen



## Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari

(Konstruktion von elektronischen Apparaturen für die Forschung an Atomen)

Die Namensgebung basiert auf der Zusammenarbeit mit Unternehmen in der  
Magnetbeschleunigertechnologie



## Electron Light Source

(Elektronenlichtquelle)

Das Kürzel "els" basiert auf der anfänglich ausschließlichen Zusammenarbeit mit Magnetbeschleuniger-Instituten

## Die **CAEN** Gruppe *Tools for Discovery*



- **CAEN S.p.A.** wurde 1979 gegründet auf Initiative von **CERN**.
- **Über 400.000 Installationen** von Detektorsystemen bei CERN, **mehrere Millionen weltweit**.
- **Über 1.000 Kunden** in mehr als **50 Ländern**.
- **Niederlassungen und Distributoren** in mehr als **30 Ländern**.
- 2016: 120 Mitarbeiter mit 16 Mio. EUR Umsatz. Umsatz 2017: > 20 Mio. EUR.
- **Zu 100% eigenfinanziert**.

### Kernkompetenzen:

Hochenergiephysik, Astrophysik, Neutrino-physik, Dunkle Materie Forschung, Teilchenphysik, Nanophysik, Didaktik, Materialwissenschaften, Medizintechnik, Sicherheitstechnik, Industrieanwendungen, Kalibriertechnologie.

## **CAENels** - von der Gründung bis heute... Gear For Science

- 2009:** Gründung von **CAENels**. Ziel: Entwicklung von High-End Netzgeräten und Strommesstechnik mit bisher unerreichter Präzision und Stabilität.
- 2011:** Erste Umsätze mit Magnetbeschleuniger-Instituten - **projektspezifische bipolare Stromquellen.**
- 2013:** Entwicklung der hochpräzisen **o-FLUCS-Strommesstechnik.**
- 2014:** Entwicklung von bi- und monopolen High-End Standard-Netzgeräten.  
Kunden in Industrie, Automotive, Batterietechnologie und Medizintechnik.
- 2015:** Gründung der US-amerikanischen Niederlassung in New York City.
- 2016:** Gründung der deutschen Niederlassung bei Karlsruhe.  
**Neue Kunden in der Kalibriertechnologie.**
- 2017 ff.:** Kontinuierliche Neuentwicklungen von kundenspezifischen und Standardgeräten im High-End Bereich nach neuestem Stand der Technik.





## Produktlinien



### Power Supply Systems



### Precision Current Measurements



### Beamline Electronic Instrumentation



### FMC MicroTCA







## o-FLUCS-DCCT-Technologie



**DCCT = Direct Current Current Transformer**



## Strommessverfahren im Vergleich

Eigenschaft/Fähigkeit	Shunt	Hall Effect Sensor	Stromtransformator	Rogowski Spule	CAENels ZERO FLUCS DCCT
DC-Ströme	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Bandbreite	Mittel	Sehr niedrig	Hoch	Sehr hoch	Hoch
Isolation	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Linearität	Mittel	Sehr niedrig	Niedrig	Mittel	Sehr hoch
Genauigkeit	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Offset	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Hohe Ströme	Nein	Mittel	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Magnetische Sättigung	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein
Temperaturstabilität	Mittel	Niedrig	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Leistungsaufnahme	Hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Mittel
Größe	Sehr klein	Klein	Klein	Mittel	Mittel
Langzeitstabilität	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Sehr gut	Sehr gut
AECQ Automotive Zulassung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Automotive Interface Möglichkeit	Schwierig	Möglich	Schwierig	Möglich	Möglich

## O-FLUCS-DCCT-Technologie

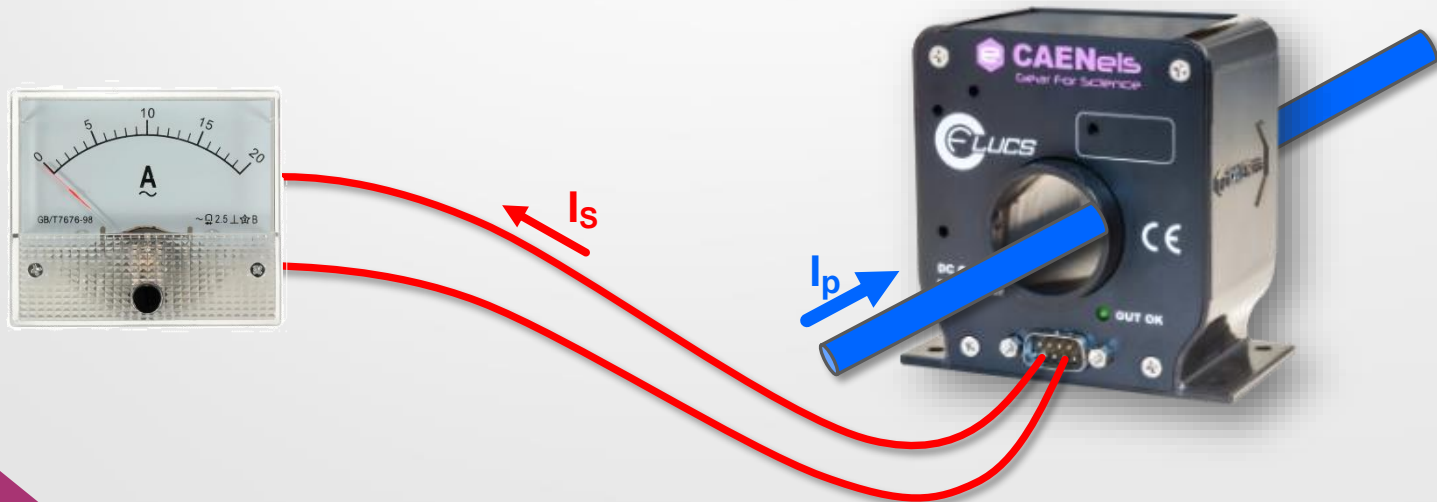
- Das **ZERO-FLUCS** Prinzip wurde in den 1930er Jahren entdeckt und für Luftspaltmagnetometer verwendet
- In den späten 1960er Jahren wurde der erste DCCT bei CERN gebaut
  - Messungen von DC bis 500 kHz
  - Messungen von mA bis zu Dutzenden von kA
  - Höchste Präzision, Genauigkeit und Stabilität



## CAENels DCCT Grundprinzip

Ein Strom  $I_p$  (**Primärstrom**) wird durch Rundmagneten (Toroids) geleitet und erzeugt im Magnetkörper einen dem Strom proportionalen Magnetfluss (Ampèresches Gesetz).

In einer Sekundärwicklung, die um den Toroid angebracht ist, wird ein dem Magnetfluss proportionaler  $I_s$  (**Sekundärstrom**) induziert, der entsprechend dem Übersetzungsverhältnis der Sekundärwicklung (z.B. 1:1000) gemessen werden kann.

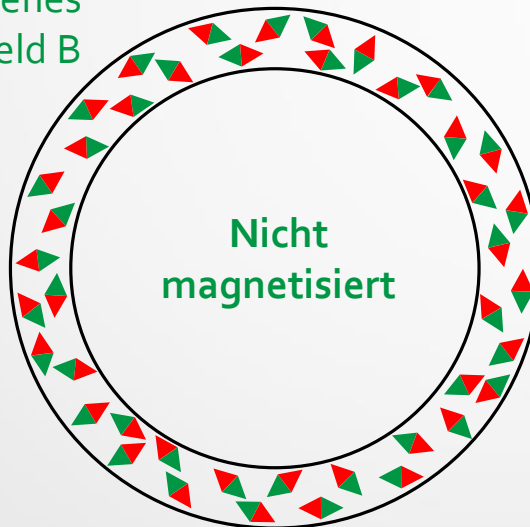




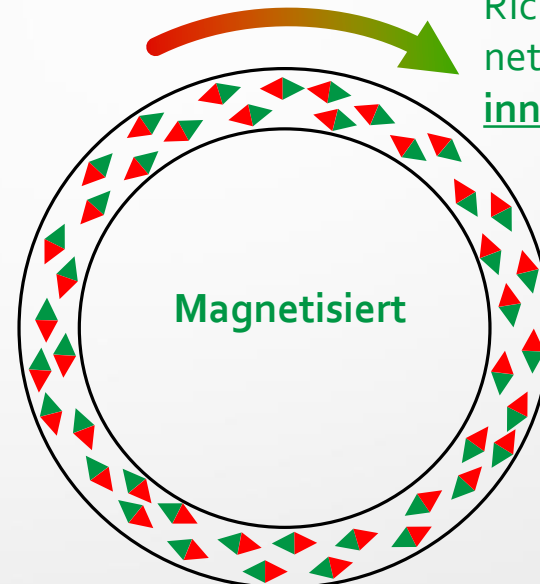
## DCCT – The Toroid

Der Kern der DCCTs ist aus **TOROIDs** aufgebaut – Ringe aus ferromagnetischem Material.

Keine Richtung,  
kein homogenes  
magnetisches Feld B



Richtung des mag-  
netischen Feldes B  
innerhalb des Toroid



Die Elementarmagneten haben eine zufällige Richtung, wenn sie nicht magnetisiert sind. Durch eine Magnetisierung richten sie sich gleichmäßig aus. Dann gibt es ein **magnetisches Feld B innerhalb des TOROID** – es summiert sich zu Null Magnetfluss:

**ZERO FLUX!**

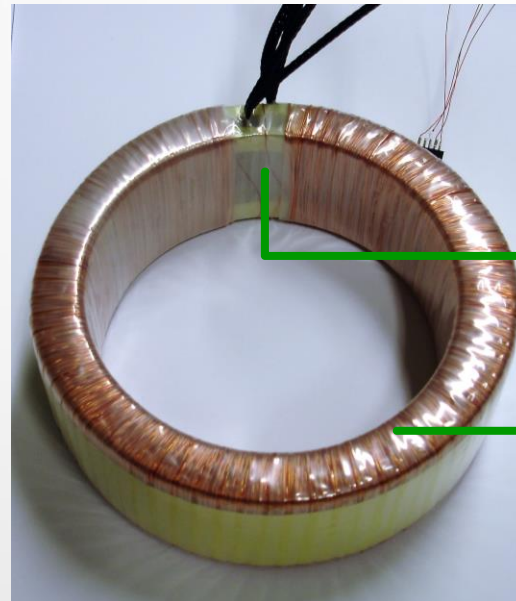
## CAENels Toroid Grundkörper

Die Kerne des DCCT bestehen aus drei Kunststoffringen (zwei für DC und einer für AC).  
Darum wird ein Tape aus ferromagnetischem Metall mit spezieller Hysterese gewickelt.  
Im nächsten Schritt wird die Sekundärwicklung aufgebracht.



## CAENels Toroid umwickelt

Die Toroids werden mit einer so genannten Sekundärwicklung umwickelt. Ein Strom durch die Sekundärwicklung erzeugt einen Magnetfluss.



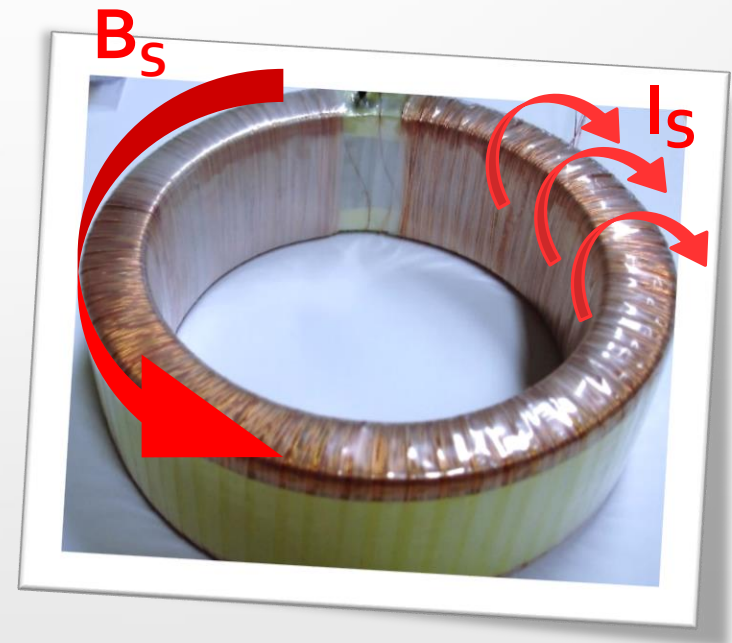
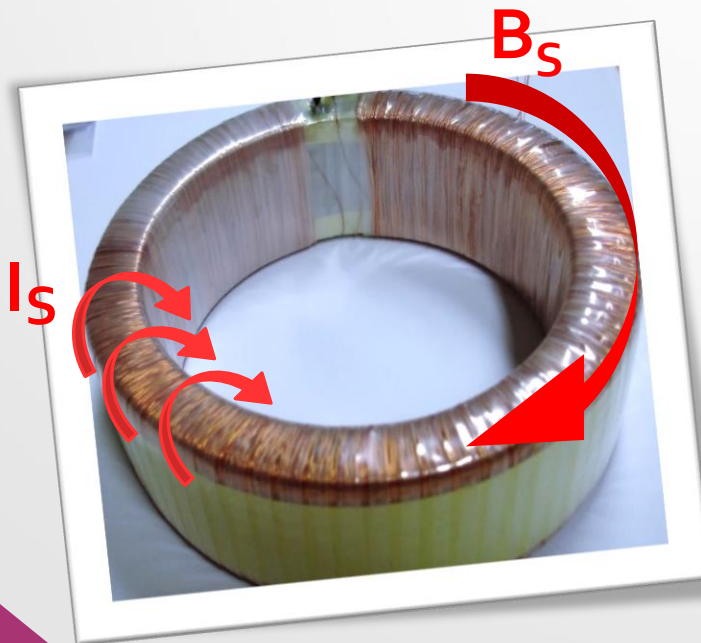
Toroid

Bis zu 2.000 Windungen

## DCCT – Sekundärstrom und Magnetfluss

Ein Sekundärstrom  $I_S$  durch die Wicklung erzeugt einen magnetischen Fluss  $B_S$  im Toroid.

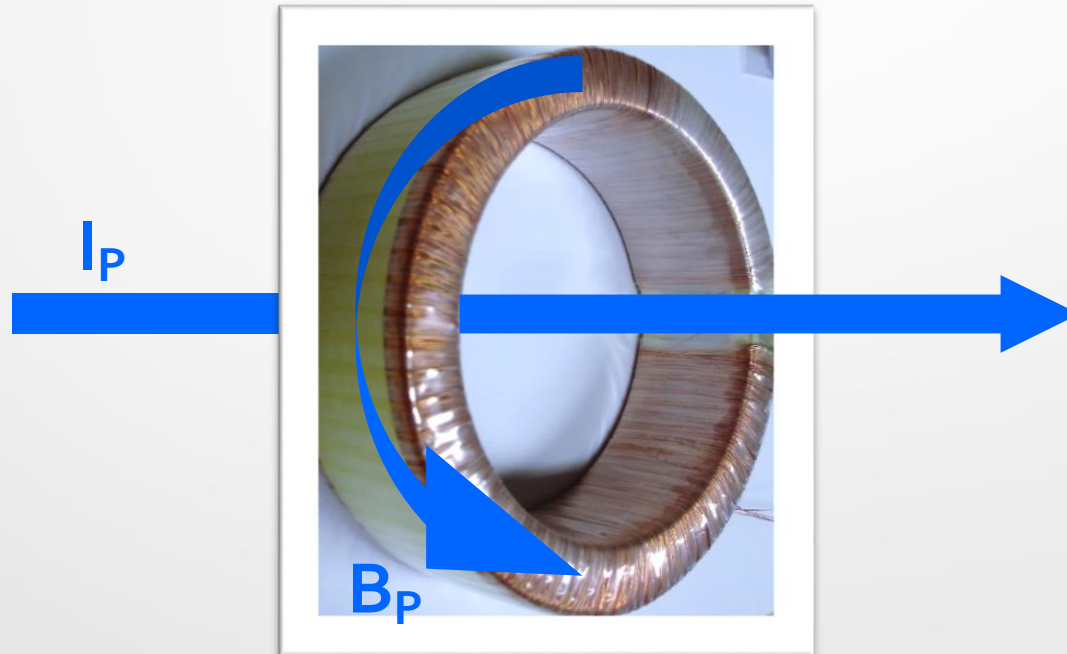
Die Richtung von  $B_S$  ist nach der **Rechte Hand Regel** bestimmt. Die Stärke des Magnetfelds entspricht der Stromstärke  $I_S$  (Ampèresches Gesetz).





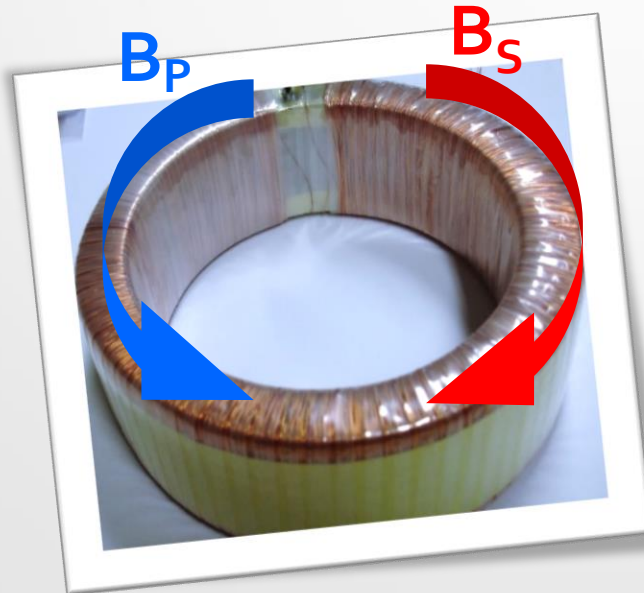
## DCCT – Primärstrom und Magnetfluss

Ein Primärstrom  $I_p$  durch den umwickelten Toroid erzeugt im Toroid einen Magnetfluss  $B_p$ .



## DCCT Grundprinzip

Der Magnetfluss  $B_P$  wird durch den entgegengesetzten Magnetfluss  $B_S$  auf **ZERO FLUCS** kompensiert.



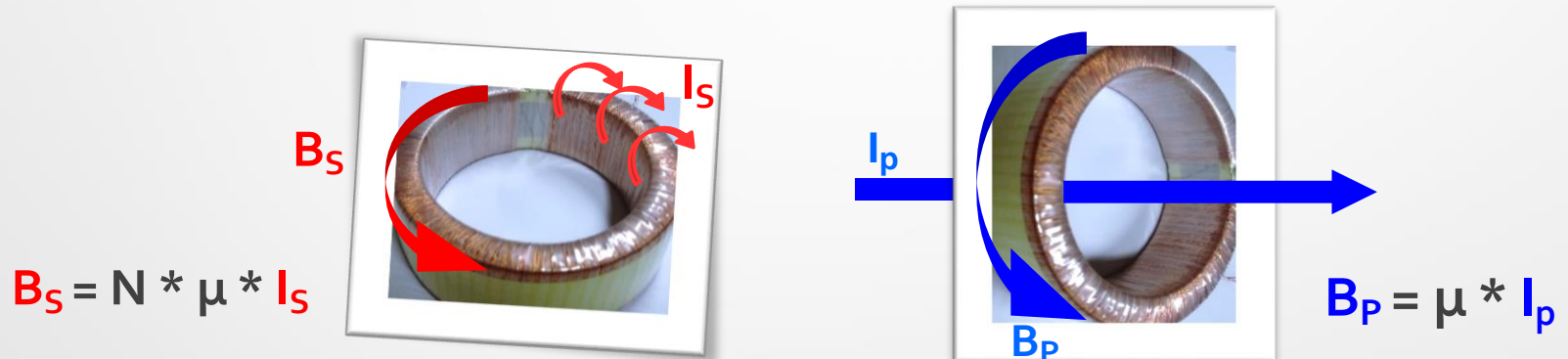
$$\Sigma (B_P + B_S) = 0$$

## DCCT Grundprinzip

Wenn die entgegengesetzten magnetischen Flüsse in Summe **ZERO** ergeben, sind Primärstrom und Sekundärstrom (multipliziert mit der Anzahl der Windungen) gleich.

N = Windungszahl

$\mu$  = Magnetische Permeabilität



Wenn  $B_S = B_P$ , dann ergibt sich:  $N * \mu * I_S = \mu * I_P$

$$I_P = N * I_S$$



## DCCT Meilenstein

$$I_p = N * I_s$$

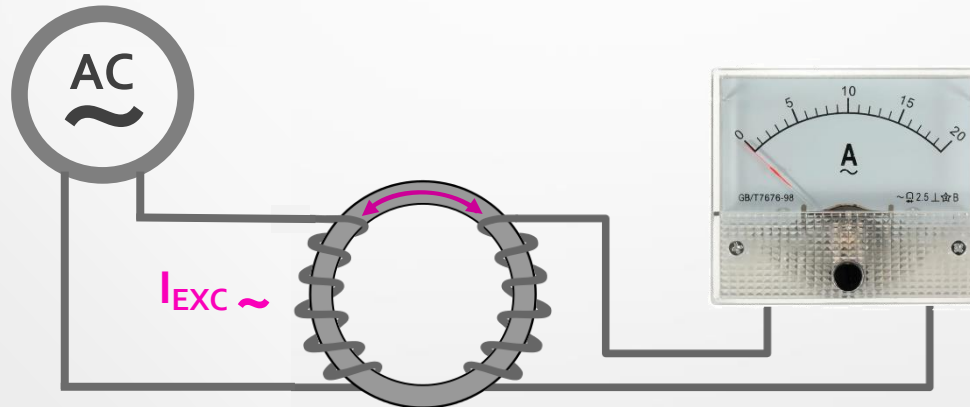
Aber:

Wie erkennt man, ob die Magnetflüsse sich zu **ZERO** summieren?

## DCCT Erregerwicklung

Die Erkennung geschieht über eine Erregerwicklung und deren Strom  $I_{\text{EXC}}$  (Excitation Current).

Der Erregerstrom **MUSS** nach den "Faradayschen Gesetzen der Induktion" ein **Wechselstrom sein**. Damit wird ein **DEFINIERTER** Wechsel-Magnetfluss im Toroid erzeugt.



Ergebnis: Gleichströme im Primärleiter werden erkannt!

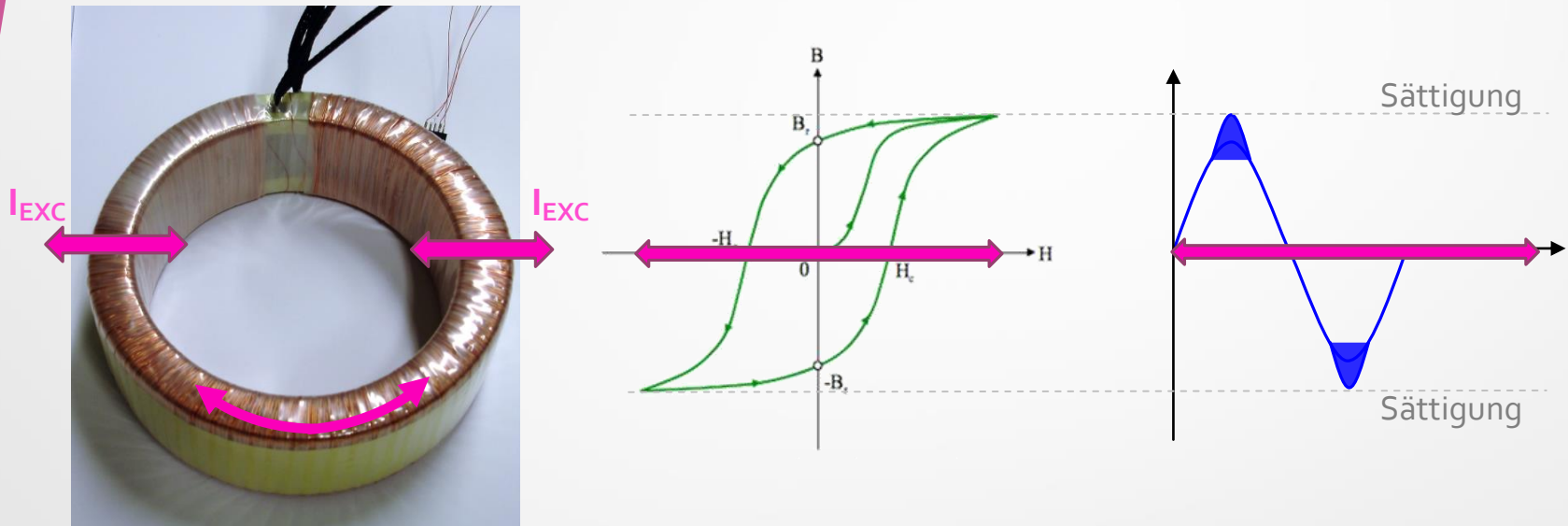


## CAENels DCCT – DC und AC

- Die Messung von DC und AC wird im DCCT getrennt durchgeführt
  - DC- und AC-Anteil werden kombiniert ausgegeben

**Die Präsentation geht zunächst auf die Messung von DC-Strömen ein!**

## DCCT – Erregerwicklung und Hysterese

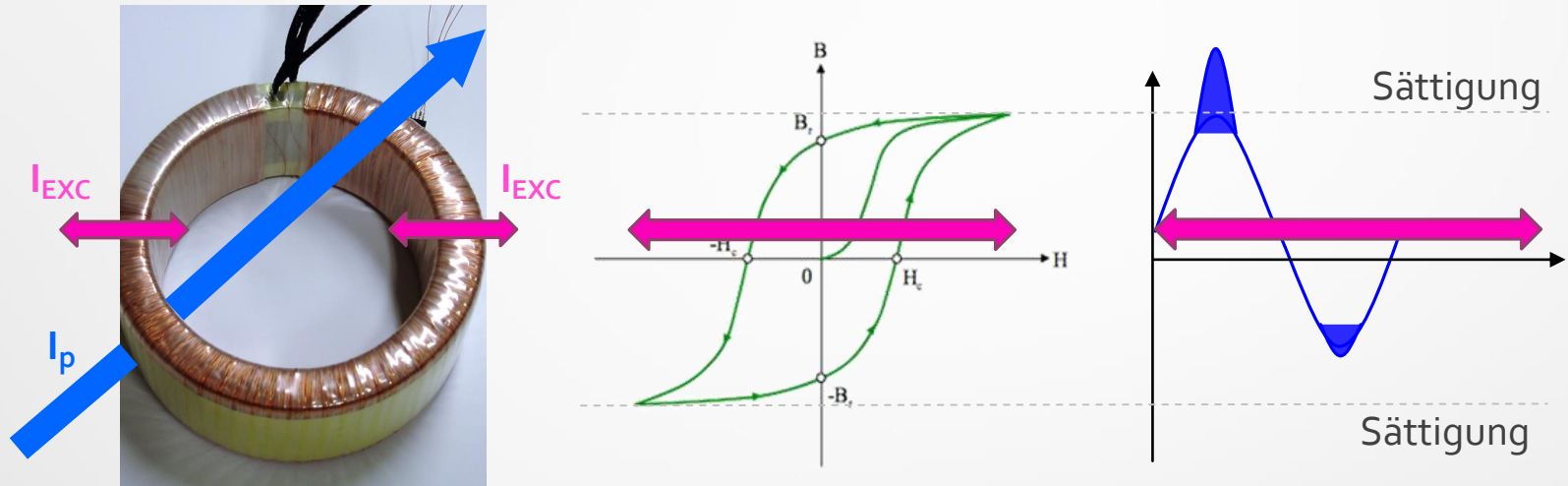


Der Wechselstrom in der Erregerwicklung erzeugt im Toroid einen Wechselmagnetfluss.

Dieser folgt der Hystereseurve.

Der Sinus des Stroms wird im Bereich der magnetischen Sättigung verzerrt. Sein Wert ergibt gemittelt **ZERO**.

## DCCT - Erregerwicklung und DC primär



Bei einem Primärstrom  $I_p$  (Gleichstrom) durch den Toroid wird der Sinus des Erregerstroms in der Y-Achse verschoben.

Der magnetische Fluss im Toroid ist ungleich **ZERO**.

Der Sekundärstrom  $I_s$  wird angepasst und der magnetische Fluss ergibt wieder **ZERO**.

$$B_p + B_s + \sum B_{EXC} = 0$$



$$I_p = N * I_s$$

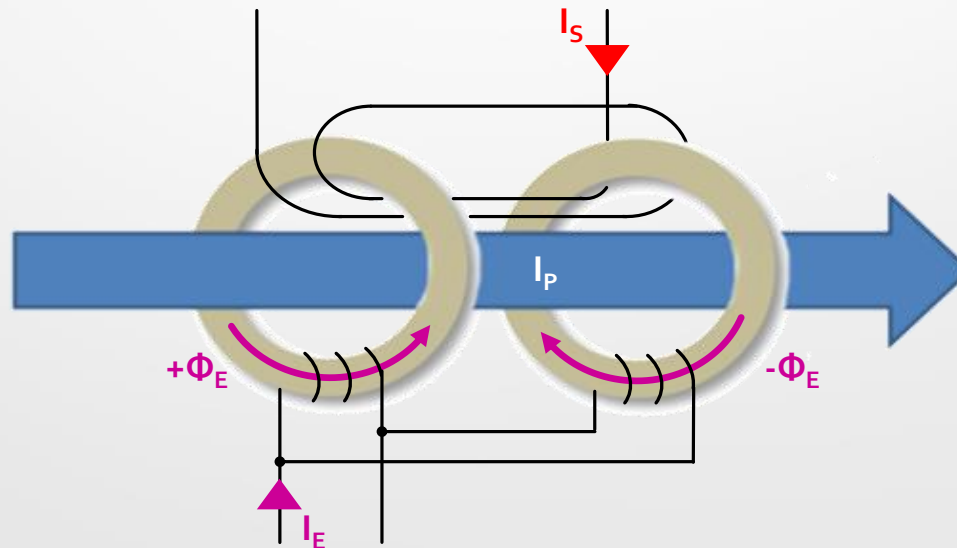


## DCCT - Feintuning

Ein negativer Effekt des Erregerstroms ist eine minimale Beeinflussung des Primärstroms über das von ihm erzeugte Wechselfeld.

Ein zweites Toroid wird dazugenommen, auf dem die Erregerwicklung entgegengesetzt zum ersten Toroid aufgebracht wird. Damit heben sich die Erreger-Magnetfelder wieder auf.

Der Primärstrom bleibt unbeeinflusst.

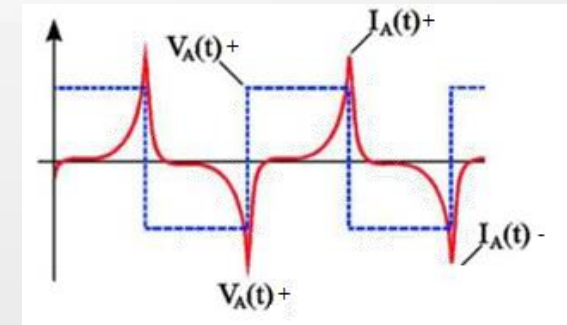
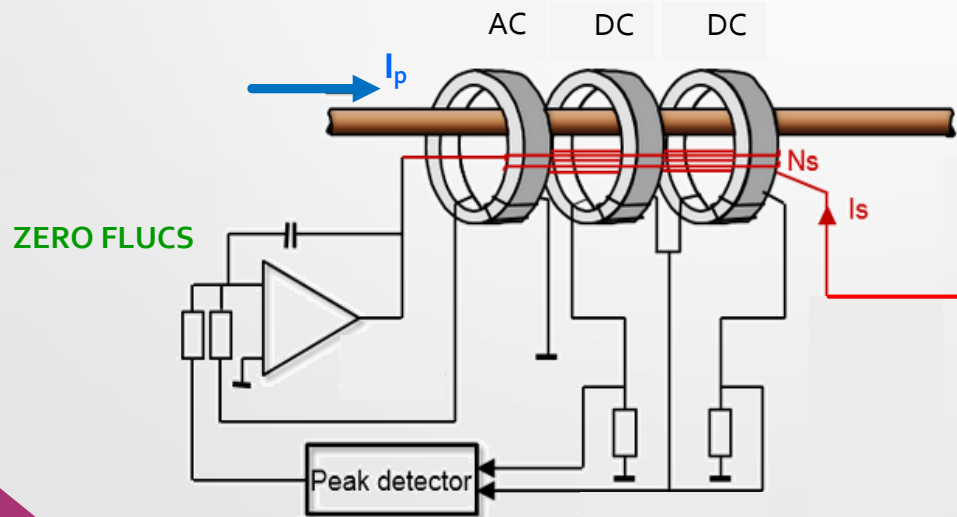


## DCCT - AC-Toroid

Bis zu diesem Punkt wurde erklärt, welcher Aufbau notwendig ist, um Gleichströme zu messen.

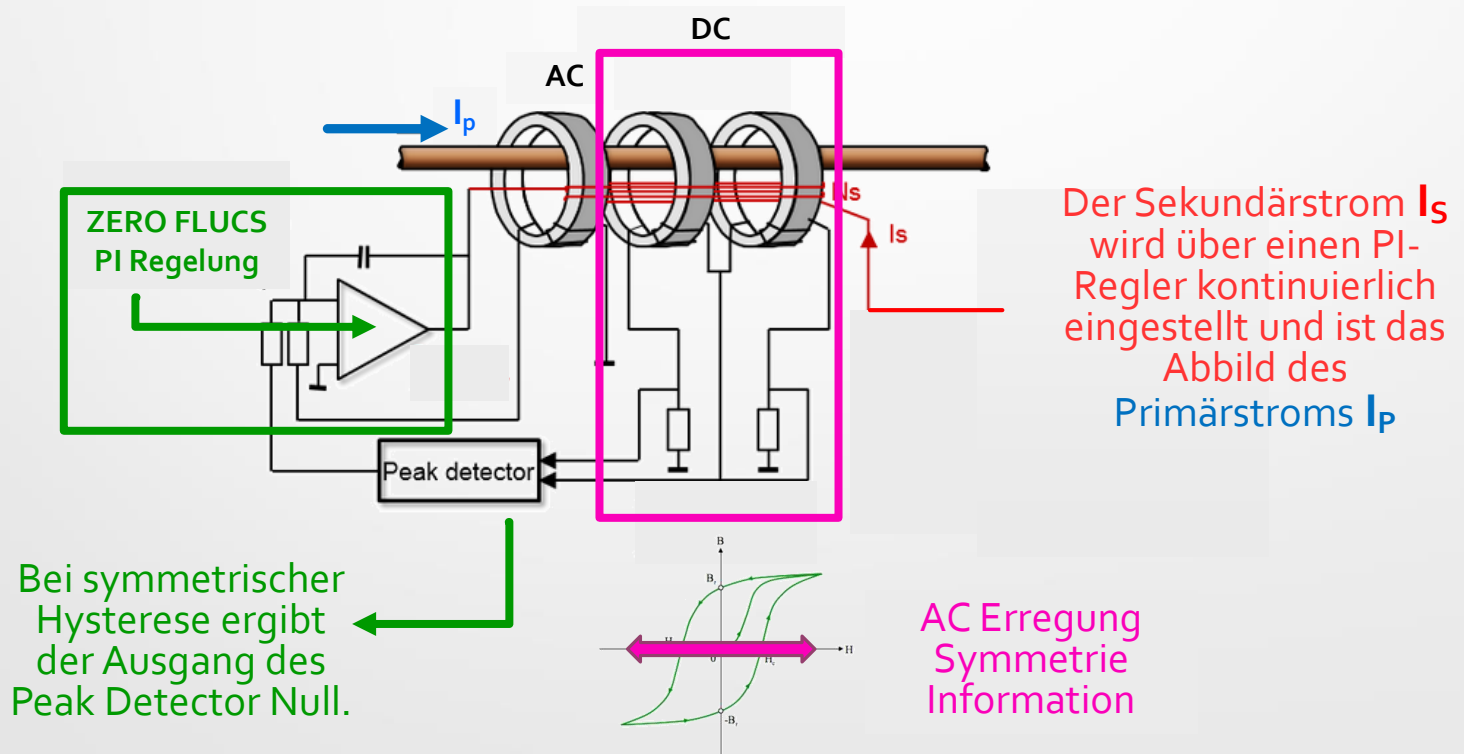
Um auch zusätzlich Wechselströme messen zu können, benötigt man einen dritten Toroid.

Bei Beaufschlagung mit einem Wechselstrom ohne DC-Offset ist der Stromverlauf analog zur Hysteresekurve, ergibt aber gemittelt immer Null, unabhängig vom tatsächlichen Stromverlauf.



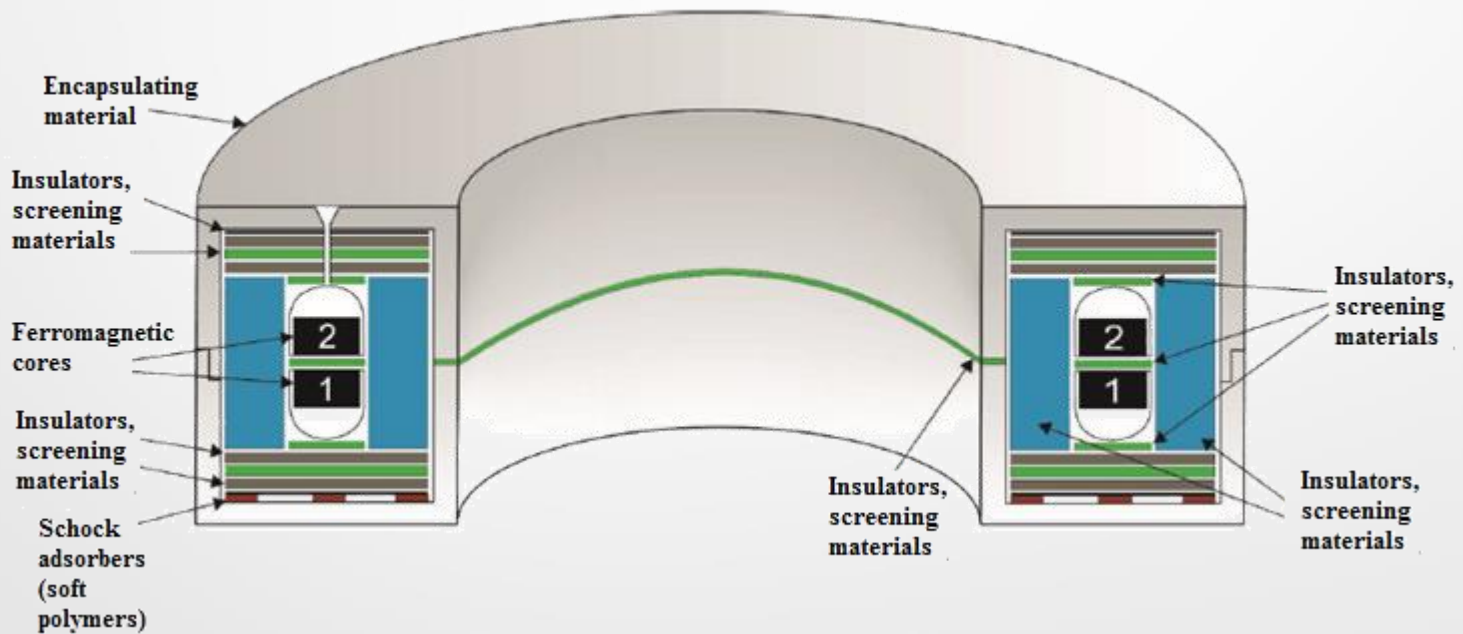
# DCCT - Gesamtprinzip

Zwei Toroids messen den DC-Anteil.  
Der dritte Toroid ist verantwortlich für den Wechselstromanteil.



## DCCT – struktureller Aufbau

Das Herzstück eines DCCT (Direct Current Current Transformer) sind die ferromagnetischen Toroids. Zusammen mit weiteren Komponenten ergibt sich ein komplexes Gesamtsystem.



Bei diesem Aufbau sind nur zwei Toroids vorhanden. Hiermit kann lediglich Gleichstrom gemessen werden.



## DCCT – State-Of-The-Art

Warum dieser komplexe Aufbau für eine Strommessung?

- Die Symmetrie der Hystere verändert sich nicht bei Temperaturänderungen.  
Temperaturkoeffizient kleiner als 0,0001%
- Kein Drift von elektronischen Bauteilen (wie bei Hall-Sensoren oder Shunts).  
Genauigkeit besser als 99,997%  
Linearität besser als 99,999%
- Um höhere Ströme zu messen, muss man lediglich das Übersetzungsverhältnis erhöhen.  
Somit sind genaue Messungen für praktisch beliebig hohe Ströme möglich.



## System CT-BOX plus CT - Features

- AC- und DC-Messungen separat oder kombiniert
- Genauigkeit: <100 ppm (<0,01%) FS, kalibriert: <50 ppm (<0,005%) FS
- Temperaturkoeffizient: <1 ppm/K FS
- Linearität: <3 ppm/FS
- Input Noise: <1.5 ppm bei 200 Hz, < 10 ppm bei 50 kHz
- Exzellente AC-Amplituden und Phasenlinearität bis zu 500 kHz
- 24-bit @ 100 kSPS Sampling
- Standard-Übertragungsverhältnis:  $I_S/I_P$  von 1:250 bis 1:2000
- Display: 7 1/2 Digits

CT-13  
CT-26  
CT-52



CT-100  
CT-150



CT-200  
CT-300  
CT-400



CT-600  
CT-1000





## System CT-BOX plus CT - Features

- Galvanische Isolierung Primär zu Sekundär
- Externer Temperatur Sensor (für Temperaturmonitoring)
- Lüfterlos
- **microSD** für Datenspeicherung (auch für Langzeitmessungen)
- Analoger Monitoringausgang ( $\pm 10$  V)
- **CT-Viewer Software** gratis
- Trigger Input/Output und Alarm Output
- Schnittstellen: **Ethernet 10/100 Mbps TCP-IP, USB 2.0, RS-232**
- Kabel **inklusive**

CT-13  
CT-26  
CT-52



CT-100  
CT-150



CT-200  
CT-300  
CT-400



CT-600  
CT-1000





## System CT-BOX plus CT - Kundenanpassung

- Kundenspezifische Übertragungsraten
- Stromwerte bis zu 30 kA
- Version Spannungsausgang: Erhöhung Genauigkeit auf 0,05%
- Erhöhung des Lochdurchmessers auf 80 mm
- Platinenmontierbare Versionen bis zu 150 A

CT-13  
CT-26  
CT-52



CT-100  
CT-150



CT-200  
CT-300  
CT-400



CT-600  
CT-1000







CT-13V  
CT-26V  
CT-52V



CT-100V  
CT-150V



CT-200V  
CT-300V  
CT-400V



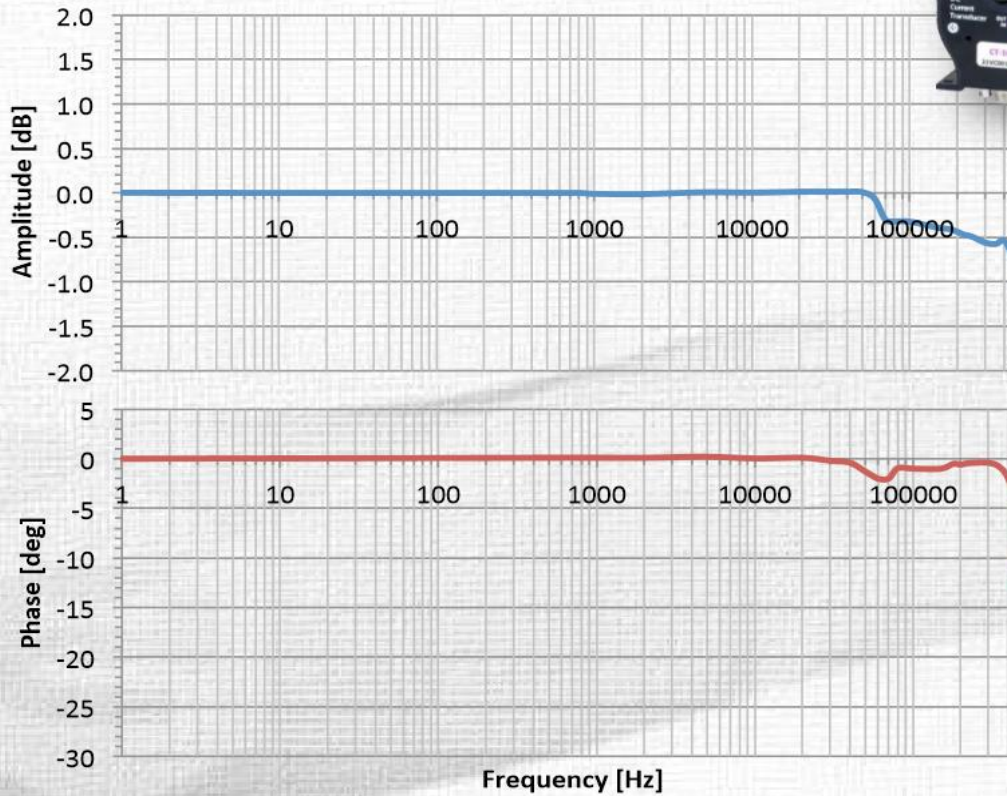
CT-600V  
CT-1000V

## DCCT-Version mit Spannungsausgang $\pm 10V$

- Gleiche Stromwerte wie bei der Version mit Stromausgang verfügbar
- Genauigkeit von  $<0,25\%$  oder  $<0,05\%$

## AC Performance

• CT-150 Amplitude and Phase Response



### Amplitude Response

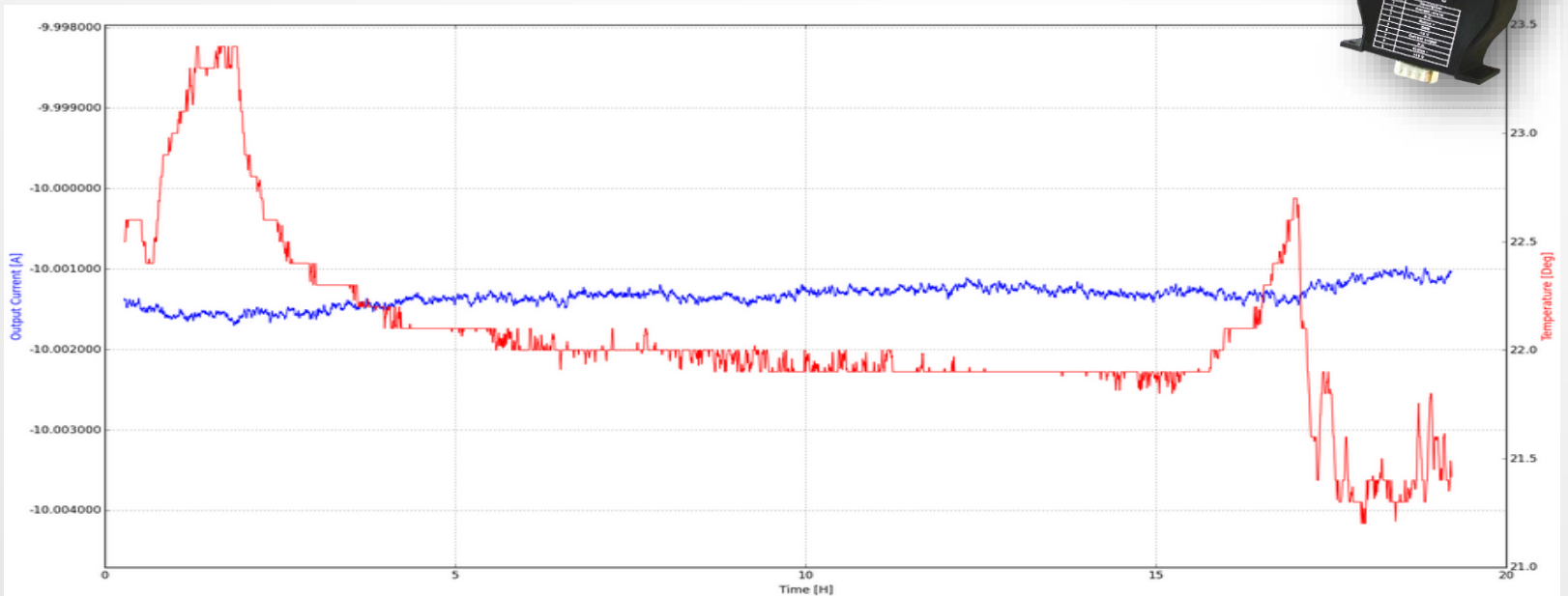
Frequency	Amplitude
DC ... 50 kHz	< 0.02 dB
50 ... 200 kHz	< 0.5 dB
200 ... 400 kHz	< 1 dB

### Phase Response

Frequency	Phase Shift
DC ... 2 kHz	< 0.1°
2 Hz ... 40 kHz	< 0.5°
40 ... 400 kHz	< 2°



## Langzeit- und Temperaturstabilität (Beispiel):



- Dauertest über 19 Stunden mit einem CT-100 (Full Scale 100A)
- Temperaturänderung von 2,2 °C zwischen 21,2 °C bis 23,4 °C
- Schwankung der Strommessung zwischen 10,0023 A und 10,0030 A = 0,0007A

**Bei Full Scale von 100 A entsprechen 0,0007A:**

**0,0007% oder 7 ppm**

# CT-BOX

## CT-Viewer Software



**CHARGER**

**Current [A]: -0.0630024**

**Head T. [°C]: 32.7**

**CHARGER**

General Acquisition I/O Alarm SD Card Calibration

**CT-BOX Info**

Matched Head: CT-600 41X0022

CT-BOX S.N.: 15A05X001

CT-BOX fw Ver.: 1.015

**DCCT Head Info**

Head S.N.: CT-600 X0022

Head is match: Yes

**CT-BOX**

User Name: CHARGER

System Date [dd/mm/yyyy]: 16/07/2015

Sistem Time [hh:mm:ss]: 18:14:21

**CT-BOX Ethernet**

IP Add. in use: 192.168.0.15 / New: 192.168.0.15

Sub.M. in use: 255.255.255.0 / New: 255.255.255.0

Gatew. in use: 192.168.0.1 / New: 192.168.0.1

MAC Address: 00.12.5e.01.05.05

## Herkömmliches Messsystem

Digital Multimeter (mindestens 7,5 digits) + DCCT



- ✗ mehrfach höhere Kosten
- ✗ nicht aufeinander kalibriert – ungenaue Messungen
- ✗ hochwertige Kabel separat zu beschaffen
- ✗ niedrigere Frequenzen bis max. 100kHz möglich
- ✗ keine Datenspeicherung möglich
- ✗ schlechter transportierbar
- ✗ schlechter einbaubar
- ✗ keine spezifische Softwarelösung

## CT-BOX System



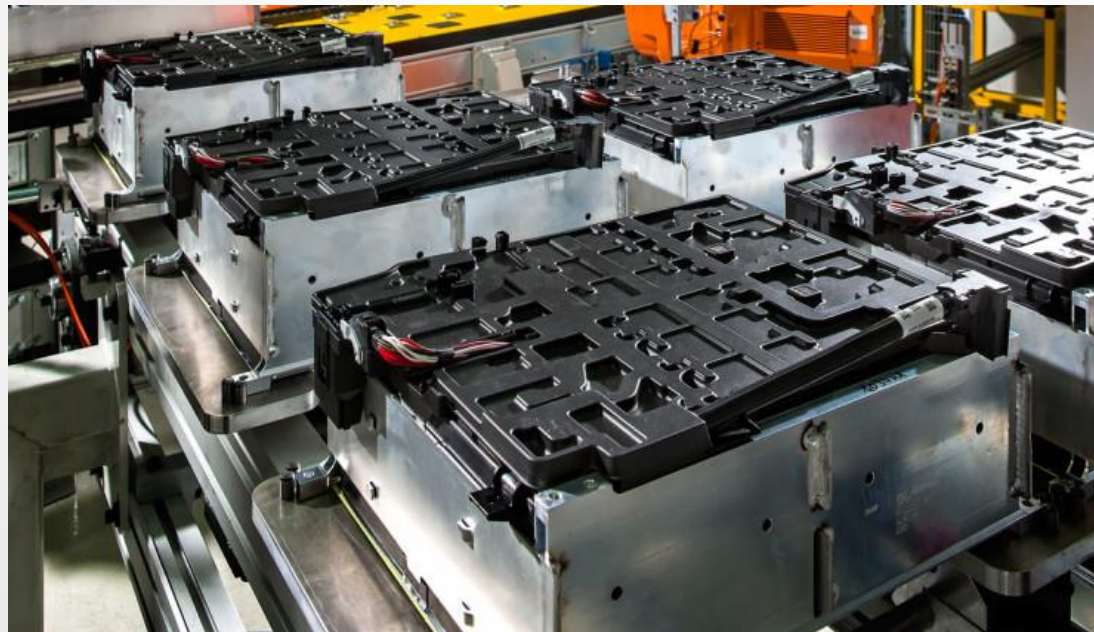
- ✓ geringere Kosten
- ✓ System aufeinander kalibriert
- ✓ Kabel inklusive
- ✓ Frequenzen bis 500 kHz
- ✓ Datenspeicherung über SD
- ✓ kompaktes System
- ✓ 19"- Einbausystem optional
- ✓ Monitoring-Software inklusive

## CAENels DCCT in der Anwendung



Testsystem für DC-DC-12V/48V-Konverter für E-Cars

## CAENels DCCT in der Anwendung



Testsystem der On Board Batteriesysteme

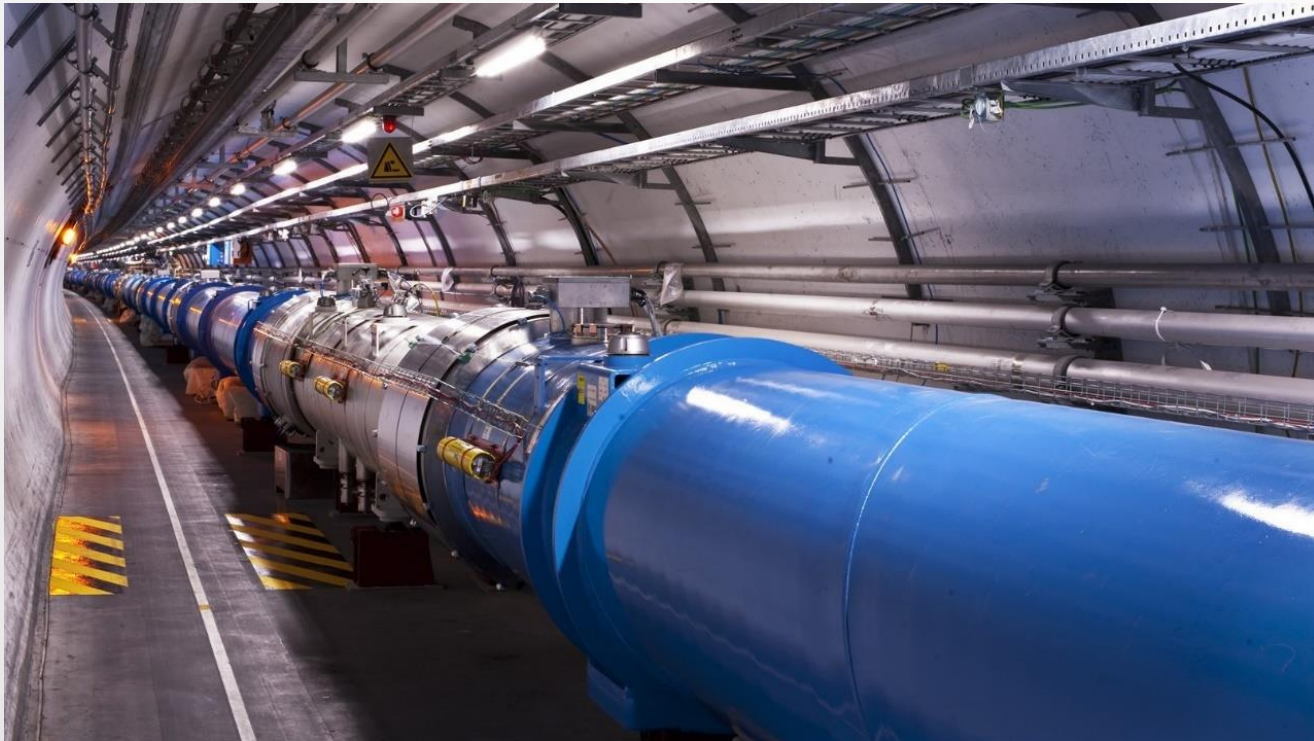
## CAENels DCCT in der Anwendung



Testsystem der Motorsteuerung für den Elektromotor eines Formula E-Wagens



## CAENels DCCT in der Anwendung



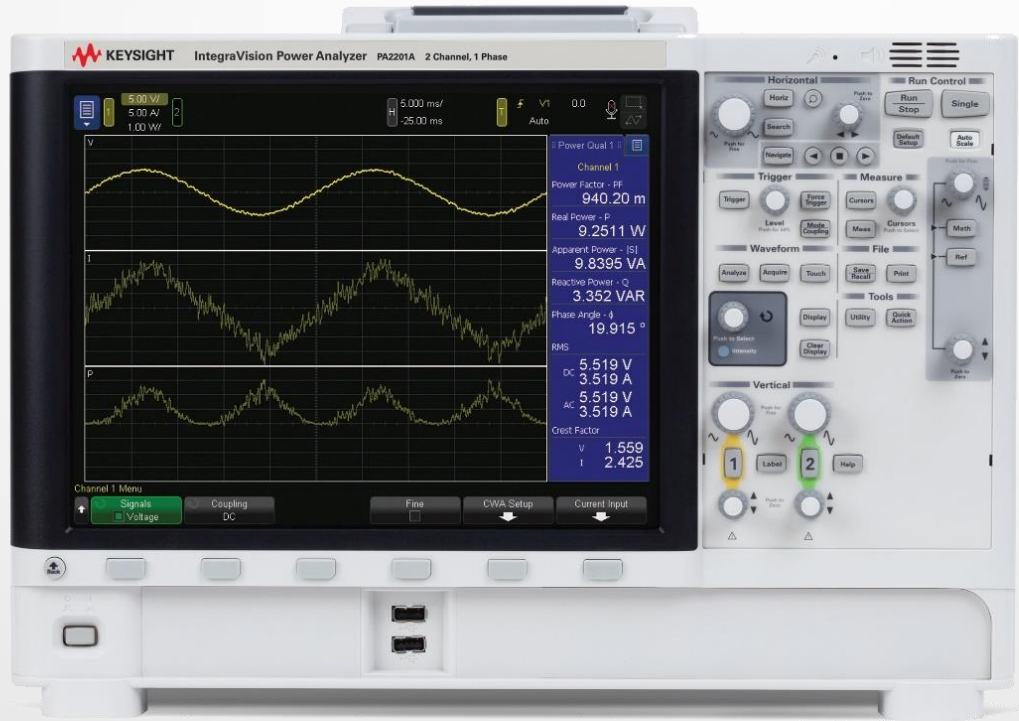
Einsatz in Speicherringen für Magnetbeschleunigeranlagen weltweit

## CAENels DCCT in der Anwendung



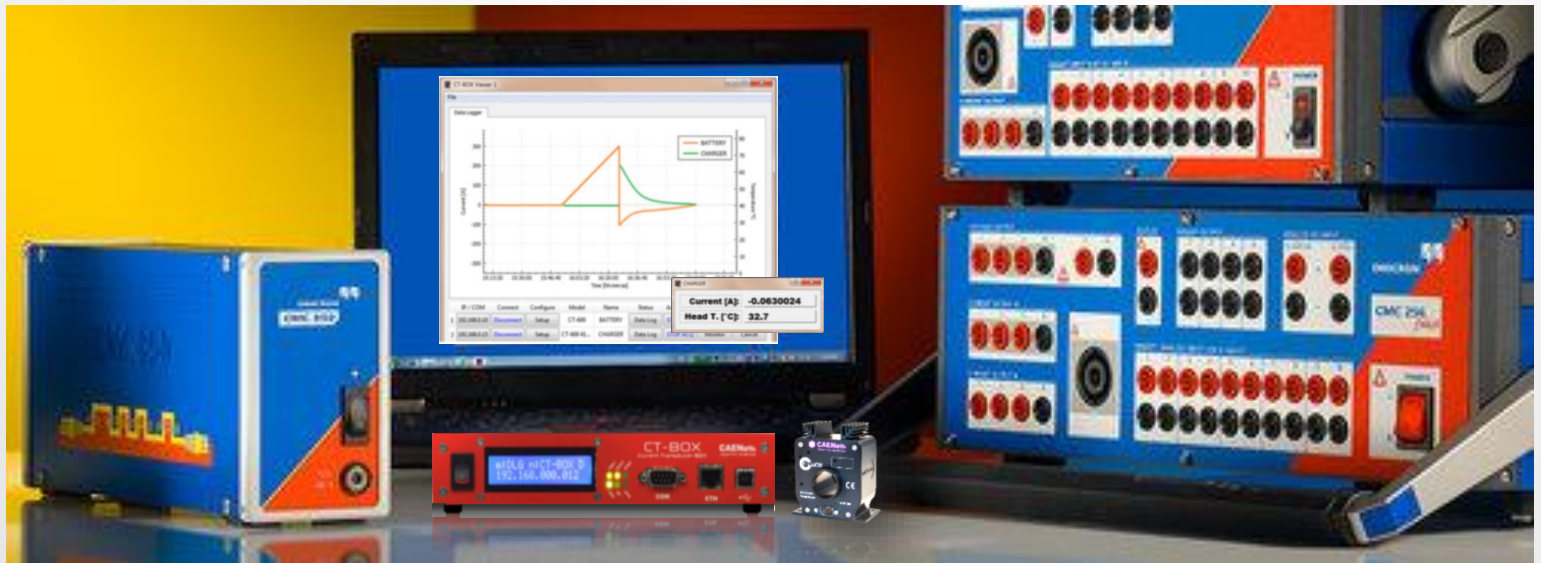
Einsatz in Computertomographen zur hochpräzisen Regelung der Magnetfelder

# CAENels DCCT in der Anwendung



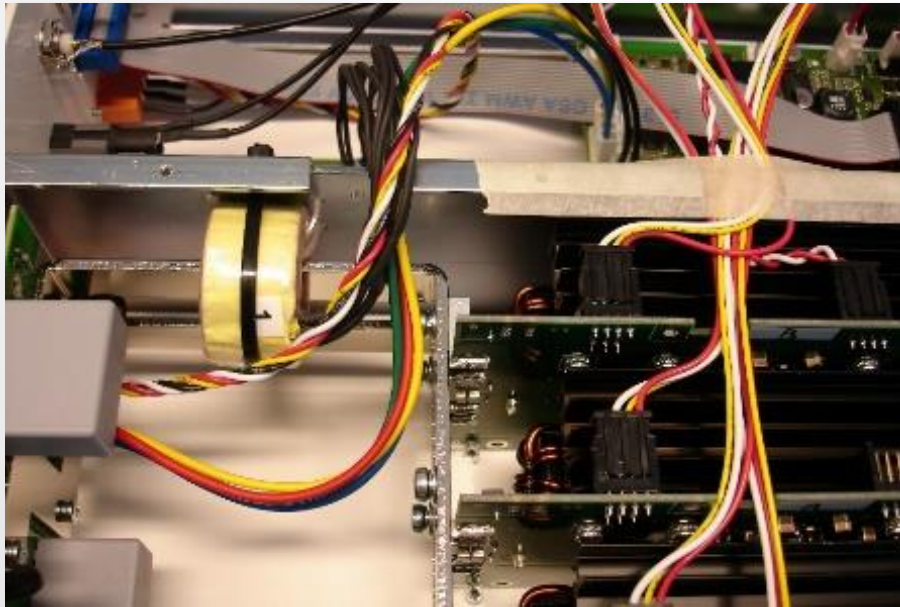
Messbereichserweiterung für Leistungsanalysatoren

## CAENels DCCT in der Anwendung



Kalibriersysteme für Tester im Bereich Elektrische Energie

## CAENels DCCT in der Anwendung



On board für CAENels Stromquellen – Vervielfachung der Genauigkeit, Stabilität und Linearität um den Faktor 10 bis 100 und mehr

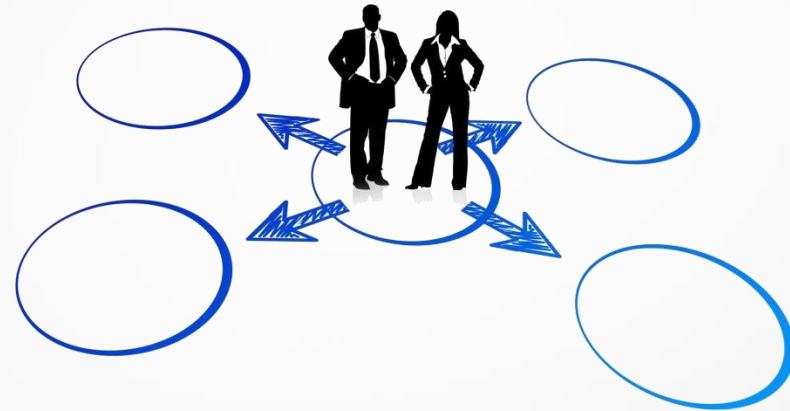


## CAENels DCCT – Varianten + Preise

Variante	
DCCTs mit <u>Strom</u> ausgang (13A – 1.000A) – Genauigkeit <0,003%	390-495 EUR
DCCTs mit <u>Spannung</u> s Ausgang (13A – 1.000A) – Genauigkeit <0,25%	490-625 EUR
DCCTs mit <u>Spannung</u> s Ausgang (13A – 1.000A) – Genauigkeit <0,05%	575-710 EUR
CT-BOX (inklusive DCCT / 100A – 1.000A) – Genauigkeit <0,01%	4.050-4.650 EUR
CT-BOX (inklusive DCCT / 100A – 1.000A) – Genauigkeit <0,005%	5.370-5.970 EUR
PS1215 Spannungsversorgungen	294 – 360 EUR

**CAEN ELS s.r.l.**  
German Branch Office  
Pfarrer-Frey-Str. 32  
76770 Hatzenbühl  
(near Karlsruhe)

Tel. +49 1590 523 8983  
mail: [j.theiner@caenels.com](mailto:j.theiner@caenels.com)  
web: [www.caenels.com](http://www.caenels.com)



**Für Fragen stehe ich gerne zur Verfügung.**

**Sprechen Sie mich an!**