

## Kolloquium

### Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler in der Niederspannung

Oliver-Luca Schmidt

Rolf Janssen GmbH Elektrotechnische Werke

Betreuung:

Dr.-Ing. Sandro Günter  
Dipl.-Ing. Rainer Ludewig

## Wichtig / Note 1

- Begrüßung der Prüfer
- Vorstellung
- Thema: Stromwandler & Fremdfelder

## Zeitplanung

00:00

bis

00:30

**Begrüßung:** Herzlich willkommen zur Präsentation meines Kolloquiums. Mein Name ist Oliver-Luca Schmidt.

**Thema:** Das zentrale Thema meiner Bachelorarbeit war die Analyse der Messabweichung von Messstromwandlern, verursacht durch magnetische Fremdfelder.

**Kernfrage:** Ich habe untersucht, wie stark benachbarte Leiter die Messung in kompakten Schaltanlagen verfälschen und wie wir damit umgehen können.

**Überleitung:** Ich freue mich, Ihnen das Thema und meine Ergebnisse nun näherzubringen.

## Agenda

- ▶ Einleitung
- ▶ Grundlagen der Arbeit
- ▶ Messergebnisse
- ▶ Fazit und Ausblick

Wichtig / Note 1

- Übersicht des Vortrags
- Roter Faden

Zeitplanung

04:30

bis

05:00

**Struktur:** Ich habe meine Präsentation in folgende Bereiche gegliedert, um Sie durch das Thema zu führen.

**Einleitung:** Ich beginne mit der Motivation und der Problemstellung. Daraus leite ich die konkrete Zielsetzung meiner Arbeit ab.

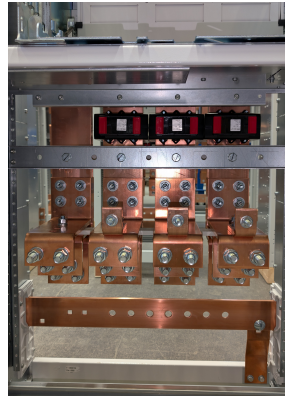
**Hauptteil:** Anschließend gehe ich kurz auf die theoretischen Grundlagen und den Versuchsaufbau ein. Im Kernteil präsentiere ich Ihnen dann die Messergebnisse und deren Analyse.

**Abschluss:** Zum Schluss fasse ich die Erkenntnisse zusammen und gebe einen Ausblick auf mögliche Handlungsfelder für die Zukunft.

## Motivation

### Herausforderung Kompaktbauweise

- ▶ Minimale Abstände zwischen Hochstromschienen und Wandlern
- ▶ **Folge** Signifikante Messabweichungen durch magnetische Fremdfelder
- ▶ **Ziel** Findung einer technisch robusten und kosteneffizienten Lösung



Frontansicht der Anlage

Wichtig / Note 1

- Bild: Enge zeigen
- Folge: Abweichung
- Ziel: Günstige Lösung

Zeitplanung

01:30

bis

02:15

**Herausforderung:** Auf dem Bild ist die hohe Packungsdichte der Anlage zu sehen bei der Hochstromschienen und Wandler auf engstem Raum verbaut sind.

**Folge:** Diese Nähe führt physikalisch dazu dass magnetische Fremdfelder einkoppeln und die Messergebnisse signifikant verfälschen.

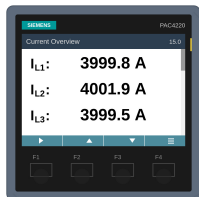
**Ziel:** Mein Ziel ist es eine technisch robuste Lösung zu finden die diesen Einfluss minimiert und dabei wirtschaftlich bleibt.

## Problemstellung – Messabweichung

**Parameter:** Übersetzungsfehler  $\varepsilon$  bei 100 %  $I_{pn}$   
erlaubt  $\pm 1$  %

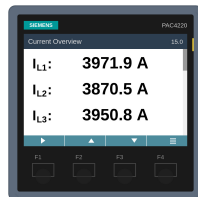
**Grenzwert:** Klasse 1

Vergleich bei 4000 A Primärstrom – Symmetrische Last



**Referenz (Sollwert) Kl. 0,2S**

L1 -0,005 %  
L2 0,047 %  
L3 -0,012 %



**Prüfling (Beeinflusst) Kl. 1,0**

L1  $\approx -0,704$  %  
L2  $\approx -3,238$  %  
L3  $\approx -1,230$  %

**Wichtig / Note 1**

- L2: -3,2 % Fehler
- System verzerrt

Zeitplanung

02:15

bis  
03:15

**Vergleich:** Hier sehen Sie den direkten Vergleich zwischen der präzisen Referenzmessung links und dem beeinflussten Prüfling rechts.

**Beobachtung:** Besonders in der hervorgehobenen Phase L2 bricht der Messwert ein und weist eine Abweichung von etwa 3,2 Prozent auf.

**Bewertung:** Dieser Fehler liegt weit außerhalb der zulässigen Toleranz von einem Prozent für die Genauigkeitsklasse 1.

## Problemstellung – Wirtschaftliche Relevanz

### Analyse der Abweichung

- ▶ Messdifferenz / Untererfassung Phase L2  $\Delta I \approx 130 \text{ A}$
- ▶ Relative Abweichung  $\approx -3,25 \%$
- ▶ Kritisch für Netzschutz und Verrechnung

### Potenzieller Abrechnungsfehler (Beispielrechnung)

$$P_{\text{Verlust}} = U_{\text{L-N}} \cdot \Delta I_{\text{L2}} \cdot \cos \varphi \cdot t$$

$$\Delta I_{\text{L2}} = 130 \text{ A bei } 230 \text{ V (L-N)}$$

- × Leistungsfaktor ( $\cos \varphi = 0,9$ )
- × Dauerlast (8760 h/a)
- × Strompreis (0,20 €/kWh)

$$\approx \mathbf{47\,000 \text{ € / Jahr}}$$

Wichtig / Note 1

- 130 A Untererfassung
- 47k€ Differenz

Zeitplanung

03:15

bis

04:00

**Messdifferenz:** Durch die Abweichung fehlen uns in der Phase L2 dauerhaft etwa 130 Ampere im gemessenen Stromwert was wir als Untererfassung bezeichnen.

**Kosten:** Rechnet man diesen Fehler über die Formel für die Wirkleistung auf ein Jahr Dauerlast hoch ergibt sich eine Abrechnungsdifferenz von knapp 47.000 Euro.

**Relevanz:** Dieser Wert gilt pro Abgangsfeld was das wirtschaftliche Risiko für den Betreiber verdeutlicht.

## Zielsetzung der Arbeit

### Leitfrage der Untersuchung

*Welche Kombination aus Wandler, Geometrie und FFP hält Klasse 1 unter Fremdfeldbedingungen ein – bei minimalen Mehrkosten?*

### Untersuchungsschwerpunkte

- ▶ Systematische Analyse der Fehler im Drehstromsystem (L1, L2, L3)
- ▶ Vergleich von Standardwandlern und kompensierten Spezialwandlern
- ▶ Prüfung konstruktiver Maßnahmen (Leitergeometrie / FFP)
- ▶ Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Neukonstruktion

Wichtig / Note 1

- Leitfrage
- Vergleich & Empfehlung

Zeitplanung

04:00

bis

04:30

**Leitfrage:** Meine Arbeit beantwortet die Frage welche Kombination aus Technik und Geometrie die Klasse 1 sicherstellt ohne die Kosten zu sprengen.

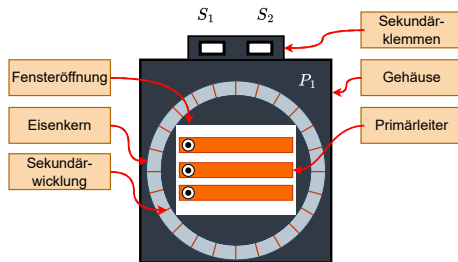
**Vorgehen:** Dazu analysiere ich die Fehler im System systematisch vergleiche verschiedene Wandlertechnologien und prüfe geometrische Anpassungen.

**Output:** Am Ende steht eine klare Handlungsempfehlung für die Konstruktion neuer Anlagen.

## Funktionsprinzip und Aufbau

### Aufgaben des Messstromwandlers

- ▶ Transformation hoher Primärströme (1 A / 5 A)
- ▶ Galvanische Trennung
- ▶ Bündelung des magnetischen Flusses



Prinzipieller Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

Wichtig / Note 1

- Transformator-Prinzip
- Schutzfunktion

Zeitplanung

05:00

bis

05:45

**Aufbau:** Bei diesen Aufsteckstromwandlern fungiert die durchgeführte Kupferschiene direkt als Primärwicklung.

**Funktion:** Der Eisenkern bündelt den magnetischen Fluss um den Leiter und induziert einen proportionalen Sekundärstrom für die Messgeräte.

**Sicherheit:** Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die galvanische Trennung um die empfindliche Messtechnik vom Hochstromnetz zu isolieren.

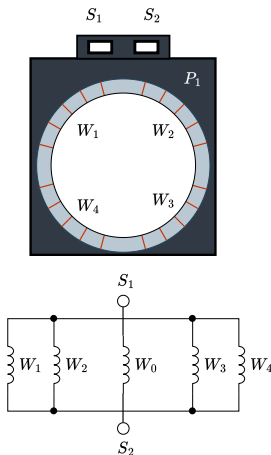
## Lösungsansatz: Kompensierte Wandler

### Funktionsprinzip

- ▶ Zusätzliche Wicklungen auf dem Eisenkern
- ▶ Erzeugung eines magnetischen Gegenfeldes
- ▶ Aktive Korrektur des Fehlers

### Vor- und Nachteile

- ▶ Deutliche Reduktion der Sättigung
- ▶ **Nachteil** Teuer & mehr



- Gegenfeld erzeugen
- Aber: Teuer & Groß

**Kompensation:** Kompensierte Wandler nutzen Hilfswicklungen auf dem Kern um aktiv ein magnetisches Gegenfeld zu erzeugen.

**Vorteil:** Dadurch wird die Sättigung des Eisenkerns verhindert was zu sehr präzisen Messergebnissen führt.

**Nachteil:** Diese Technik ist jedoch spürbar teurer und benötigt Bauraum der in unseren kompakten Anlagen oft nicht vorhanden ist.



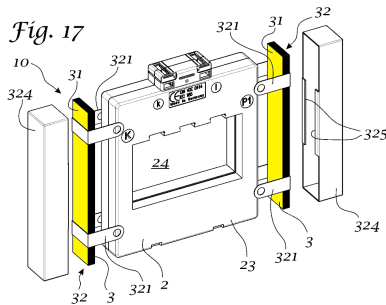
## Lösungsansatz: Fremdfeld-Protektion (FFP)

### Konstruktive Optimierung

- ▶ Gezielte Schirmung des Messkerns
- ▶ Umleitung der magnetischen Störfeldlinien

### Zielsetzung

- ▶ Einhaltung Genauigkeitsklasse 1
- ▶ Schutz vor partieller Sättigung



Quelle: Patent DE102021106843A1

(Redur)

Wichtig / Note 1

- Schirmung = Umleitung
- Nachrüstbar

Zeitplanung

06:30

bis

07:15

**Konzept:** Die FFP-Technologie setzt auf einen ferromagnetischen Schirm der hier gelb dargestellt ist um den Messkern zu schützen.

**Wirkung:** Dieser Schirm fängt externe Magnetfelder ein und leitet den Störfeldfluss gezielt am eigentlichen Messkern vorbei.

**Nutzen:** Ein großer Vorteil dieser Lösung ist dass sich Standardwandler damit kostengünstig nachrüsten lassen.

## Physikalisches Problem: Fremdfeldeinfluss

### Ursache: Räumliche Nähe

- ▶ Starke Magnetfelder der Nachbarleiter koppeln ein

### Wirkung: Partielle Sättigung

- ▶ Nutzfluss + Störfluss = Sättigung im Eisen
- ▶ Permeabilität  $\mu_r$  sinkt

**Resultat** Der Sekundärstrom sinkt, die Messung zeigt zu wenig an.

Wichtig / Note 1

- Sättigung des Kerns
- Messwert sinkt

Zeitplanung

07:15

bis

08:00

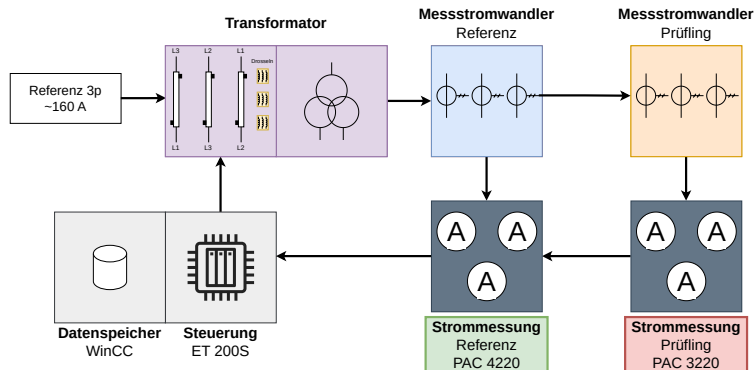
**Ursache:** Durch die räumliche Nähe koppeln die starken Magnetfelder der benachbarten Leiter ungewollt in den Wandler ein.

**Sättigung:** Die Summe aus Nutzfluss und Störfluss treibt den Eisenkern in die partielle Sättigung wodurch die Permeabilität sinkt.

**Resultat:** Das Eisen leitet den magnetischen Fluss schlechter weshalb der Sekundärstrom einbricht und wir zu wenig messen.

## Versuchsaufbau: Hochstrom-Prüfstand

### Schematischer Aufbau der automatisierten Messstrecke



**Wichtig / Note 1**

- Referenz -> Trafo -> 4kA
- Synchrone Messung
- WinCC Erfassung

Zeitplanung

**08:00**

bis  
**08:45**

**Aufbau:** Hier sehen Sie das schematische Diagramm unseres automatisierten Hochstrom-Prüfstands für die Versuchsreihen.

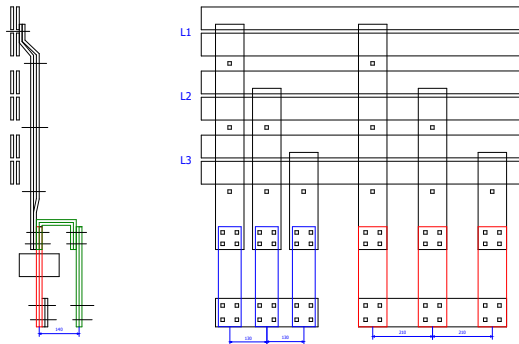
**Signalfluss:** Wir speisen niederspannungsseitig ein und transformieren den Strom über Hochstromtrafos auf bis zu 4000 Ampere hoch.

**Vergleich:** Das Kernstück ist die synchrone Messung zwischen dem Referenzgerät PAC 4220 und dem jeweiligen Prüfling PAC 3220.

**Daten:** Alle Messwerte werden zentral über Profinet erfasst und automatisch in WinCC archiviert um Ablesefehler sicher auszuschließen.

## Konstruktive Maßnahme: Dreiecksanordnung

### Realisierung der geometrischen Optimierung ( $\Delta$ -Anordnung)



- L2 versetzt (Dreieck)
- Symmetrische Abstände
- Feldkompensation

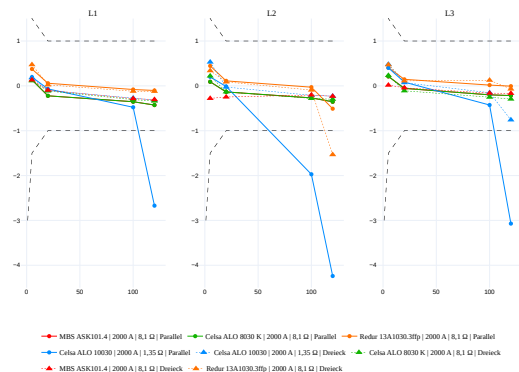
**Realisierung:** Dieses Foto zeigt die praktische Umsetzung der geometrisch optimierten Leiterführung direkt im Schaltschrank.

**Konstruktion:** Anstatt alle Schienen flach nebeneinander zu führen haben wir die mittlere Phase L2 räumlich um 140 Millimeter versetzt angeordnet.

**Effekt:** Durch das entstehende gleichschenklige Dreieck heben sich die magnetischen Vektoren im Zentrum gegenseitig auf was den Störeinfluss physikalisch minimiert.

## Marktüberblick bei 2000 A

2000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck



### Beobachtungen

- **Parallel (bunt):** Starke Spreizung der Fehlerkurven.
- **Dreieck (grau):** Fehlerband deutlich schmäler.
- **FFP (Redur):** Zeigt bereits hier die stabilsten Werte.

**Wichtig / Note 1**

- Bunte Linien = Parallel (Schlecht)
- Graue Linien = Dreieck (Besser)
- FFP stabil

Zeitplanung

**10:00**

bis  
**11:00**

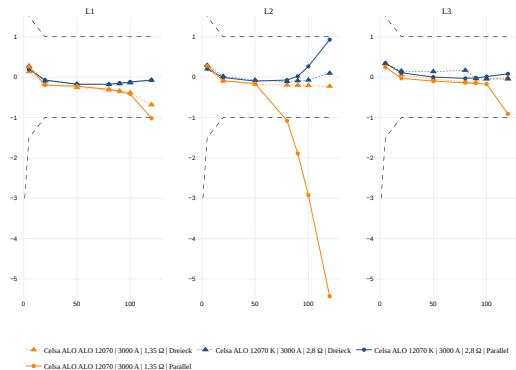
**Szenario 2000 A:** Hier sehen wir den Überblick über verschiedene Hersteller bei 2000 Ampere.

**Erkenntnis:** Die bunten Linien zeigen die klassische Parallelanordnung. Man sieht hier schon eine deutliche Spreizung der Messfehler zwischen den Phasen.

**Geometrie-Effekt:** Sobald wir auf die Dreiecksanordnung wechseln (die grauen Linien), rücken die Fehlerkurven deutlich enger zusammen. Die rein geometrische Maßnahme zeigt also bereits Wirkung.

## Validierung bei 3000 A

3000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck



### Entwicklung des Fehlers

- ▶ Sättigungseffekte nehmen zu.
- ▶ **Parallel:** Fehler wachsen überproportional an.
- ▶ **Dreieck:** Bleibt stabil, aber erste Anzeichen von Sättigung.

**Wichtig / Note 1**

- Trend setzt sich fort
- Sättigung beginnt früher
- Parallelanordnung kritisch

Zeitplanung

**11:00**

bis

**11:45**

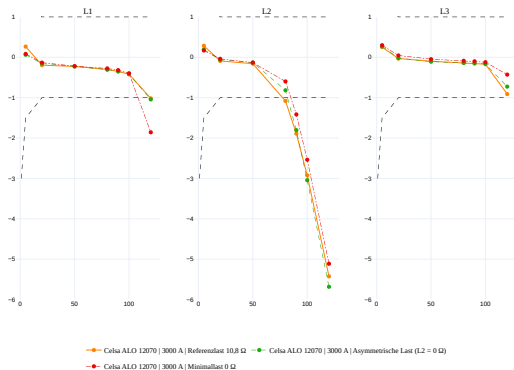
**3000 Ampere:** Bei Erhöhung des Stroms auf 3000 Ampere bestätigt sich der Trend.

**Beobachtung:** Die Fehler in der Parallelanordnung wachsen überproportional an, da der Eisenkern durch die stärkeren Fremdfelder früher in die Sättigung getrieben wird.

**Zwischenfazit:** Die Dreiecksanordnung hält das System noch stabil, aber wir nähern uns den Grenzen der Standardtechnik.

## Spezialuntersuchung: Einfluss der Bürde (3000 A)

3000 A | Fehlerkurve | Parallelanordnung mit unterschiedlichen Bürdenwiderständen



### Varianten der Sekundärlast

- ▶ **0  $\Omega$ :** Minimale Belastung (Idealfall).
- ▶ **Ref:** Nennbürde (Realfall).
- ▶ **Erkenntnis:** Hohe Bürde verschlechtert das Ergebnis signifikant (frühere Sättigung).

Wichtig / Note 1

- Test: Kabellänge/Querschnitt
- Hohe Bürde = Schlecht
- Niedrige Bürde hilft

Zeitplanung

11:45

bis

12:30

**Untersuchung:** Hier habe ich geprüft, ob man durch Optimierung der Sekundärseite (z.B. kürzere Kabel oder größerer Querschnitt) den Fehler reduzieren kann.

**Ergebnis:** Die Kurven zeigen deutlich: Eine niedrige Bürde (nahe 0 Ohm) verzögert die Sättigung und verbessert das Messergebnis. Eine hohe Bürde verschlechtert es massiv.

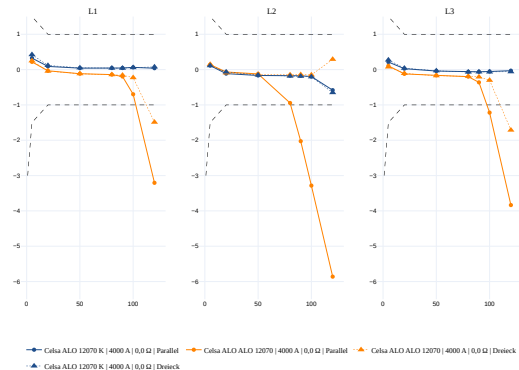
**Praxis:** Das bedeutet für die Praxis: Leitungswege kurz halten und Querschnitte großzügig dimensionieren ist eine wirksame, flankierende Maßnahme.

## Hochstrom-Szenario bei 4000 A

### Kritischer Bereich

- ▶ Standardwandler in Parallelanordnung versagen (Klasse 3).
- ▶ **Dreieck:** Bringt Verbesserung, reicht aber nicht für Kl. 0,5.
- ▶ **FFP:** Hält als einzige Lösung die Klasse 1 sicher ein.

4000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck



**Wichtig / Note 1**

- 4000 A = Extrem
- Parallel = Totalausfall
- Nur FFP sicher

Zeitplanung

12:30

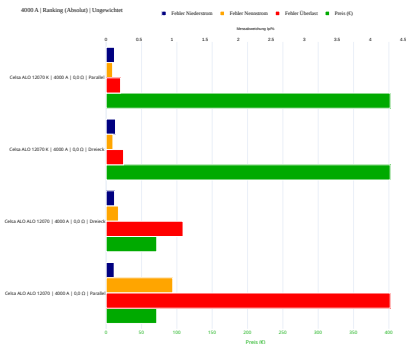
bis

13:30

**Eskalation:** Bei 4000 Ampere verschärft sich die Situation drastisch.  
**Parallelanordnung:** Die Standardwandler in Parallelanordnung (bunt) brechen komplett aus und verletzen sogar die Klasse 3. Das ist messtechnisch unbrauchbar.  
**Lösung:** Selbst die Dreiecksanordnung reicht hier für Präzisionsmessungen kaum noch aus. Lediglich die Kombination mit FFP-Wandlern garantiert hier noch die geforderte Genauigkeitsklasse 1.



## Kosten-Nutzen-Analyse (Ranking)



Datengrundlage: Mittelwert der Messabweichung  $\varepsilon$  über drei Lastbereiche:  
Niederstrom ( $< 20 \% I_n$ ), Nennstrom ( $20 \dots 120 \% I_n$ ) und Überlast ( $> 120 \% I_n$ ).

**Wichtig / Note 1**

- Ziel: Unten Links (Günstig & Gut)
- X-Achse = Mittlerer Fehler
- Sieger: Celsa Dreieck

Zeitplanung

13:30

bis  
14:30

**Entscheidungsgrundlage:** Zum Abschluss habe ich die technischen Fehlerwerte in einen wirtschaftlichen Kontext gesetzt.

**Methodik:** Auf der X-Achse sehen Sie den **mittleren Fehler** über den gesamten Arbeitsbereich. Auf der Y-Achse den Preis.

**Ziel:** Wir suchen eine Lösung im Bereich "Links Unten" – also minimaler Fehler bei minimalen Kosten.

**Ergebnis:** Es zeigt sich klar: Die Celsa-Lösung in **Dreiecksanordnung (Grau)** bietet hier das Optimum. Sie hält die Klasse 1 ein und kostet nur einen Bruchteil der vollkompensierten Systeme.

## Zusammenfassung

Wichtig / Note 1

- Ziel: Unten Links (Günstig & Gut)
- X-Achse = Mittlerer Fehler
- Sieger: Celsa Dreieck

Zeitplanung

13:30

bis

14:30

## Ausblick

Wichtig / Note 1

- Ziel: Unten Links (Günstig & Gut)
- X-Achse = Mittlerer Fehler
- Sieger: Celsa Dreieck

Zeitplanung

13:30  
bis  
14:30

Vielen Dank

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Offene Fragen

**Wichtig / Note 1**

- Ziel: Unten Links (Günstig & Gut)
- X-Achse = Mittlerer Fehler
- Sieger: Celsa Dreieck

Zeitplanung

**13:30**

bis

**14:30**