

# Einsatz von LEDs in der Thermografie: Status und Chancen

Mathias ZIEGLER \*, Henrik STEINFURTH \*, Mathias RÖLLIG \*, Philipp MYRACH \*,  
Christiane MAIERHOFER \*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12200 Berlin

## Kurzfassung

Der Einsatz optischer Energiequellen in der Thermografie bietet den herausragenden Vorteil einer vollständig berührungslosen Remote-ZfP-Technik. Die gängigsten Lichtquellen sind Blitz- und Halogenlampen mit relativ geringen Anschaffungskosten bei gleichzeitig hohen Bestrahlungsstärken am Prüfobjekt. Für gewöhnlich erlauben Halogenlampen nur geringe Modulationsfrequenzen ( $<1$  Hz) bei langen Ansprechzeiten ( $>100$  ms) und Blitzlampen nur kurze Pulse ( $<10$  ms) bei geringen Taktraten ( $>1$  Hz). Diese Lücke könnten LEDs schließen welche aufgrund der rasanten Entwicklung ihrer Bestrahlungsstärken nun auch für die thermografische ZfP interessant werden. Modulationsfrequenzen über 100 Hz mit thermischen Eindringtiefen  $< 1$  mm sind möglich. Dadurch qualifizieren sich die LEDs zur Anwendung in der Lockin-Thermografie von Metallen und zur oberflächennahen Prüfung von Schichtsystemen. Sie zeigen ähnlich dem Laser eine schmale und auf den Werkstoff abstimmbare spektrale Verteilung der Strahlungsleistung bei moderaten Kosten. Die zugrunde liegende Elektrolumineszenz generiert kaum Wärmestrahlung und ermöglicht dadurch die Prüfung während des Erwärmungsvorganges ohne größeren Aufwand. Bei Blitz- und Halogenlampen musste die entstehende thermische Eigenstrahlung noch mittels Filterung eliminiert werden.

Wir stellen den aktuellen Status des Einsatzes von Hochleistungs-LEDs der kW-Klasse in der aktiven Thermografie vor und zeigen Chancen für alternative und neue Prüfverfahren auf. So erlaubt beispielsweise die fast verzögerungsfreie Reaktion der LED auf das steuernde Signal die Verwendung nahezu beliebiger zeitlicher Anregungsformen. Perspektivisch lassen sich damit höhere und exaktere Tiefenreichweiten und Tiefenauflösungen gegenüber den klassischen Methoden der monofrequenten Lockin- und energiereichen Kurzimpuls-Anregung erzielen.

# Einsatz von LEDs in der Thermografie: Status und Chancen

**Mathias Ziegler, Henrik Steinfurth, Mathias Röllig,  
Philipp Myrach, Christiane Maierhofer**

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
12200 Berlin

[mathias.ziegler@bam.de](mailto:mathias.ziegler@bam.de)



## GLIEDERUNG

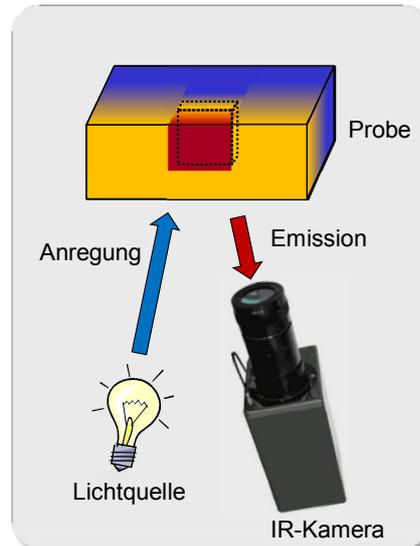
- 1 Optische thermografische ZfP
- 2 Probleme konventioneller Lichtquellen
- 3 Chancen von LED-Lichtquellen
- 4 BAM LED-Lichtquelle
- 5 Einsatzbeispiele (1-4)
- 6 Zusammenfassung & Ausblick

## THERMOGRAFISCHE PRÜFUNG

- Äußerer Energieeintrag => Wärmefluss
- Innere Fehler ändern Wärmefluss
- Detektion über Oberflächen-Temperatur(x,y,t)

## OPTISCHE THERMOGRAFISCHE ZFP

- Berührungslos, mittlere bis große (~10 cm - 100 m) Entfernung
- Energetische Anregung kann an Prüfproblem angepasst werden:
  - Räumlich: flächig, lokal,...
  - Zeitlich: Impuls (kurz/lang), moduliert,...
- Hohe Prüfraten möglich



## VORTEILE

## NACHTEILE

### Blitzlicht



- Kurzer Impuls ~ 2-5 ms
- Hohe Bestrahlungsstärke
- Flächige Anregung

- Unflexibel, nur eine Blitzdauer
- Taktrate gering < 1Hz
- Spektraler Überlapp mit IR-Kamera

### Halogenlampe



- Flächige Anregung
- Preiswert

- Mod.frequenz/Taktrate gering < 1Hz
- Spektraler Überlapp mit IR-Kamera

### Sonne



- Flächige Anregung
- Kostenlos

- Verfügbarkeit (Wolken)
- Spektraler Überlapp mit IR-Kamera
- Außenmessungen

### Laser



- Lokale/ Flächige Anregung
- Flexible Anregungszeit
- Hohe Taktraten
- Spektral sauber

- Sehr teuer
- Arbeitsschutz

### LED



- Flächige Anregung
- Flexible Anregungszeit
- Hohe Taktraten
- Spektral sauber

- Teuer (~ wie Blitz)
- Schlechte Verfügbarkeit von Hochleistungssystemen

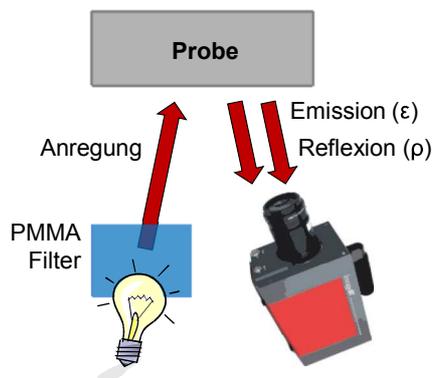
# PROBLEME KONVENTIONELLER LICHTQUELLEN

- *Spektraler Überlapp*
- *Geschwindigkeit*

## SPEKTRALER ÜBERLAPP

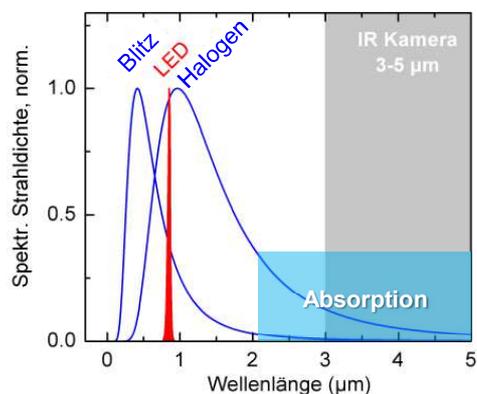
### REFLEXIONSANORDNUNG

Messung von:  
thermischer Emission der Probe  
+ Reflexion der Quelle



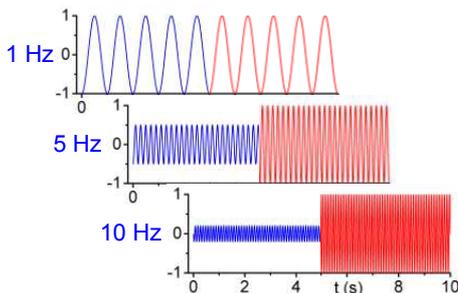
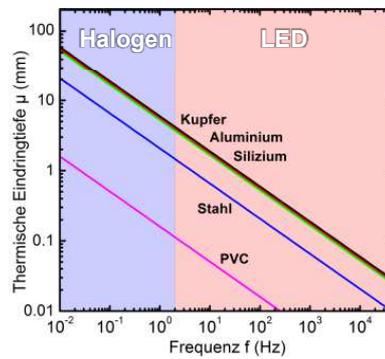
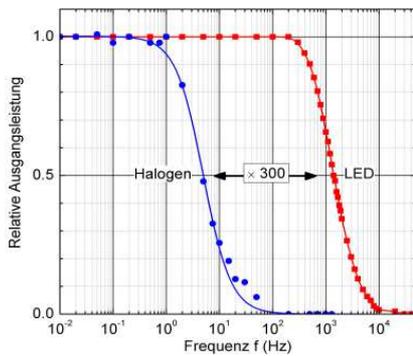
### SPEKTRALER ÜBERLAPP

Thermische Lichtquellen mit breiter Emission  
(Blitz @5-7.000 K, Halogen @3.000 K)



### LÖSUNGSANSÄTZE

- Filterung IR-Anteil, z.B. mit Plexiglasscheibe (PMMA)
- „Kalte“ Lichtquelle, LED/Laser (Elektrolumineszenz)



## THERMISCHE EINDRINGTIEFE μ (LOCK-IN)

- Information aus 1-2 μ
- μ sinkt mit Anregungsfrequenz  $f$
- μ steigt mit therm. Diffusivität  $\alpha$
- Thermische Lichtquellen zu träge für flache Defekte in Metallen

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

# CHANCEN VON LED-LICHTQUELLEN

## CHANCEN

zeitlich  
flexible  
Anregungsformen

- Kurze Impulse = Blitz
- Lange Impulse = Stufe
- Modulation = Lock-In
- Freiformen, z.B. Chirped-Sinus

geometrisch  
flexible  
Anordnung

- Reflexionsgeometrie (spektraler Überlapp)
- Mobiles Prüfmodul (kompaktes LED)

spektral  
flexible  
Anregung

- Selektive Anregung von Werkstoffen

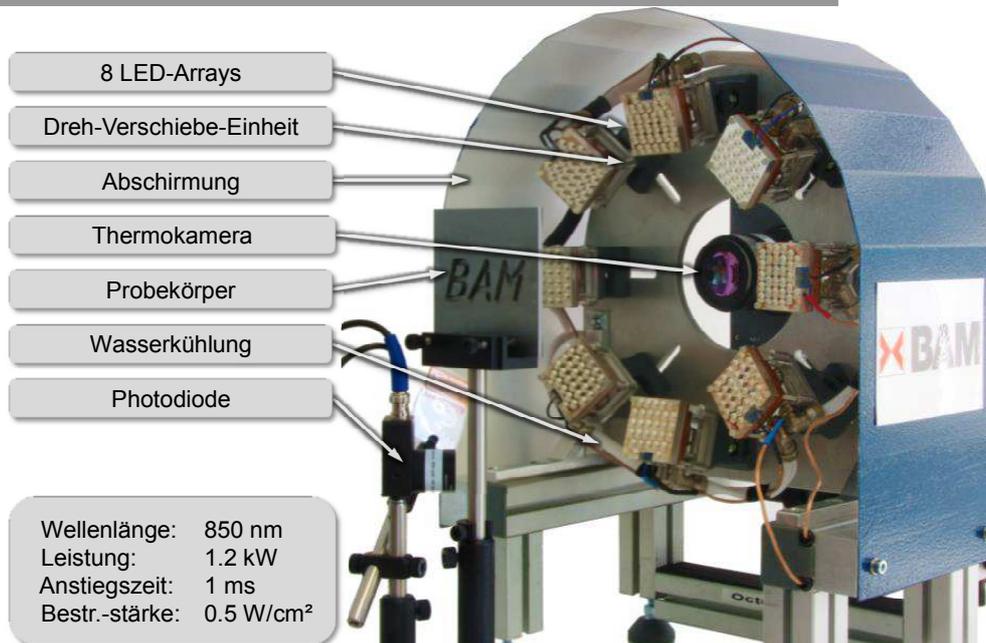
Ressourcen-  
effizienz

- Energieeffizienz (Konversion bis 20%)
- Langlebigkeit (mehrere 10.000 h)

## BAM LED-QUELLE:

# OctoLED

## BAM LED-QUELLE OCTOLED



BAM OctoLED: Patent DE 102012103975B3



## LED-EINSATZBEISPIEL 1

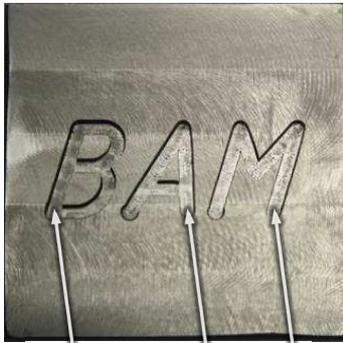
*Oberflächennahe Defekte:*

- Minderdicken in Stahl

# MINDERDICKEN IN STAHL



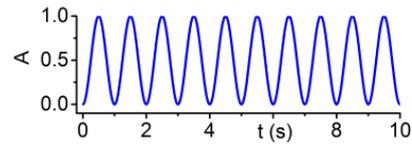
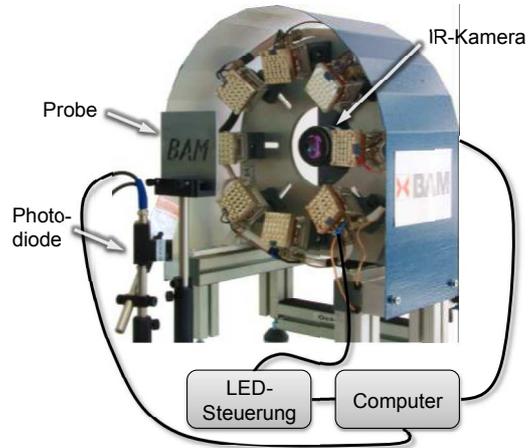
## PROBEKÖRPER



0.5 mm    1.0 mm    1.5 mm

- Stahlprobekörper 5 mm dick
- Buchstaben mit Restwandstärken 0.5-1.5 mm

## PRÜFANORDNUNG

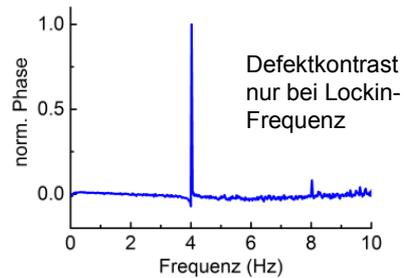


# MINDERDICKEN IN STAHL

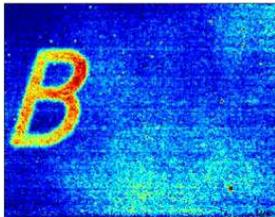


## LOCKIN-THERMOGRAFIE

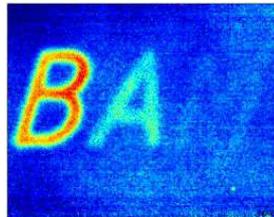
Monofrequente Anregung  
Sinus mit 2 / 4 / 10 Hz



Phasenbilder nach Fast-Fourier-Transformation



10 Hz Sin



4 Hz Sin



2 Hz Sin

- Tiefenselektive Detektion von Fehlstellen in Stahl
- Hohe Empfindlichkeit für oberflächennahe Defekte

# LED-EINSATZBEISPIEL 2

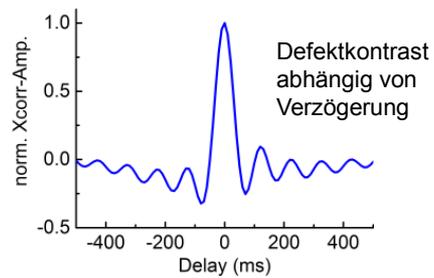
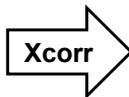
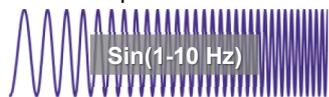
*Flexible zeitliche Anregung:*

- Verwendung von Freiformen

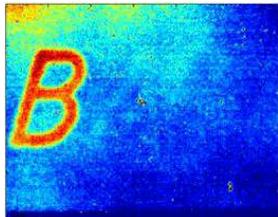
## VERWENDUNG VON FREIFORMEN

### FM-THERMOGRAFIE

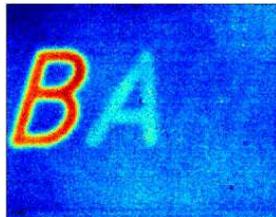
Frequenzmodulierte Anregung  
Sinus-Chirp 1-10 Hz



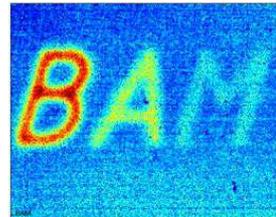
Amplitudenbilder nach Kreuzkorrelation mit Anregungssignal



30 ms Delay



60 ms Delay



110 ms Delay

- Gleichzeitige Erfassung verschiedener Defekttiefen

## LED-EINSATZBEISPIEL 3

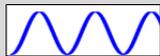
*Exakte zeitliche Anregung:*

- Tool für thermografische F&E

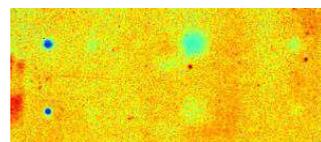
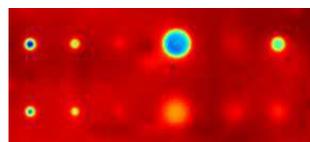
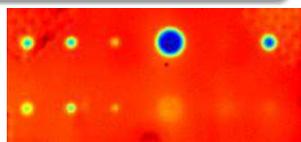
## LED ALS TOOL FÜR TT- F&E

### LOCKIN-THERMOGRAFIE VON PVC-PLATTE MIT FLACHLOCHBODENBOHRUNGEN

Sinus



**Test:** Was passiert wenn man Rechteck- anstatt Sinus-Anregungsfunktion verwendet?



0.05Hz

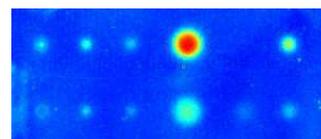
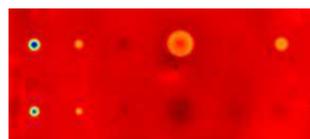
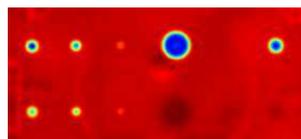
0.1Hz

0.5Hz

Rechteck



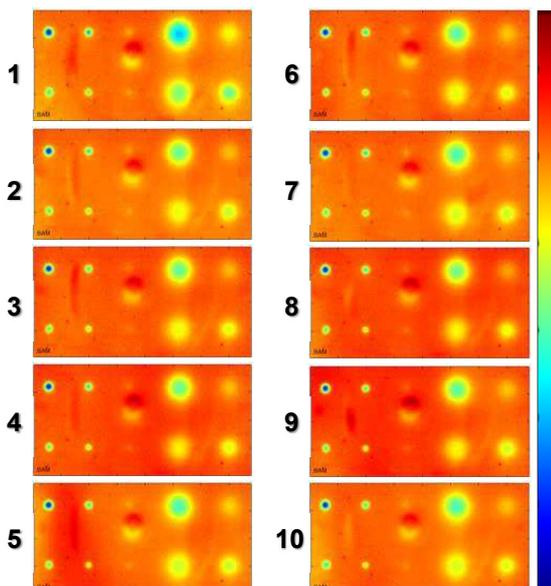
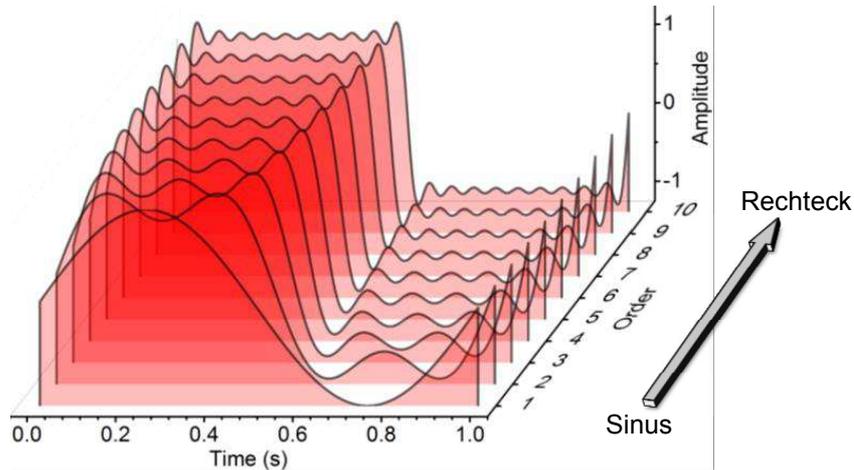
**Theorie:** Bei Grundfrequenz kein Unterschied zu erwarten => Überprüfung mit Experiment



FOURIERSYNTHESE/-REIHE VON RECHTECK AUS SINUS

$$A(f_0, F_n) = \sum_{n=1}^{F_n} \frac{\sin([2n-1]f_0)}{2n-1}$$

F<sub>n</sub>=1: A = sin(1 Hz)  
 F<sub>n</sub>=2: A = sin(1 Hz) + sin(3 Hz)/3  
 F<sub>n</sub>=3: ...



ÜBERGANG SINUS → RECHTECK

- **Keine** signifikanten Unterschiede im Phasenkontrast
- **Aber** Unterschiede in Absolutphase

**Ursache** für scheinbaren Unterschied Sinus vs. Rechteck: **Phasenlage** Anregung/Detektion

=> folgender Vortrag von **Dr. Myrach et al.**

# LED-EINSATZBEISPIEL 4

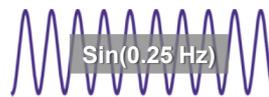
*Spektral selektive Anregung:*  
- Materialmix-Schichtsystem

## MATERIALMIX-SCHICHTSYSTEM

### BAM USB-SPEICHERSTICK IN PLASTIKHÜLLE



Ergebnisbild Lockin-Thermografie



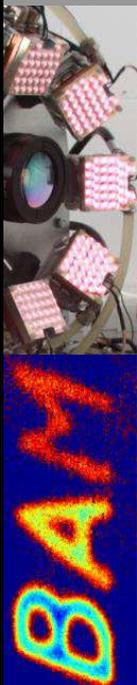
### PRÜFPRINZIP?



Plastikhülle ist  
**teiltransparent** im  
NIR => Anregung LED  
MIR => Detektion Kamera

# ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

## ZUSAMMENFASSUNG



### GEOMETRISCHE FLEXIBILITÄT

- Berührungslose, einseitige Prüfung während Anregung

### ZEITLICHE FLEXIBILITÄT

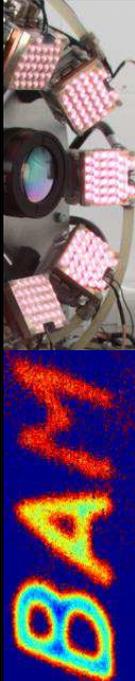
- Prüfung oberflächennaher Defekte (< 1mm)
- Exakte Kontrolle der Phasenlage
- Innovative Anregungsmuster

### SPEKTRALE FLEXIBILITÄT

- Selektive Prüfung im Materialmix

### RESSOURCENEFFIZIENZ

- Langlebige Quellen (geringe Folgekosten, keine Verbrauchsmittel)
- Mit guter Effizienz (20%)



**ERSATZ KLASSISCHER LICHTQUELLEN ???**

**Halogenlampe:** ja, bis wenige kW

**Blitzlampen:** noch nicht ganz, Steigerung der Bestrahlungsstärke oder längere Impulse erforderlich (×100...1000)

**Kosten:** Sonne 0, Halogen ~1 €/W, LED ~10 €/W, Laser ~100 €/W

**NEUARTIGE PRÜFKAPAZITÄTEN / EINSATZGEBIETE ???**

- Kleine Flächen ~10...100 cm<sup>2</sup>
- Einseitige Zugänglichkeit
- Selektiv absorbierende Werkstoffe
- Lokalisierung flacher Defekte

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

**Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung** FKZ 01FS11002  
Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung (BMW i)

**Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung** FKZ 01FS12011  
Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung (BMW i)

**Hochleistungs-LED-Anregungsquelle für die thermografische Prüfung in der Automobilindustrie (AutoLED)** BMW i-Akz. 21/11  
Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Umsetzung von Innovationen in den Bereichen Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung - MNPQ-Transfer (BMW i)

**DANKSAGUNG**

- Projektpartner: Institut für Kunststofftechnik (IKT), inpro GmbH, DIN, DGZfP e.V.
- Marco Lucht (BAM)