



# "Globale Sensitivitätsanalyse in der praktischen Anwendung mit LS-OPT V4.1"

**Gordon Geißler**

Anja Förderer (Uni Karlsruhe)

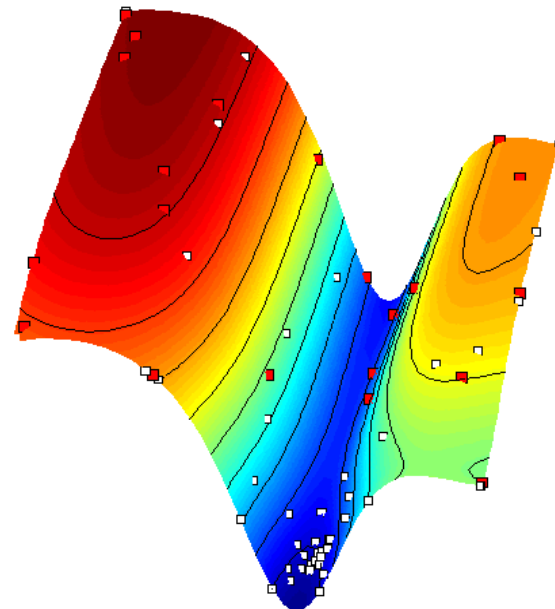
Björn Hohage (Audi)

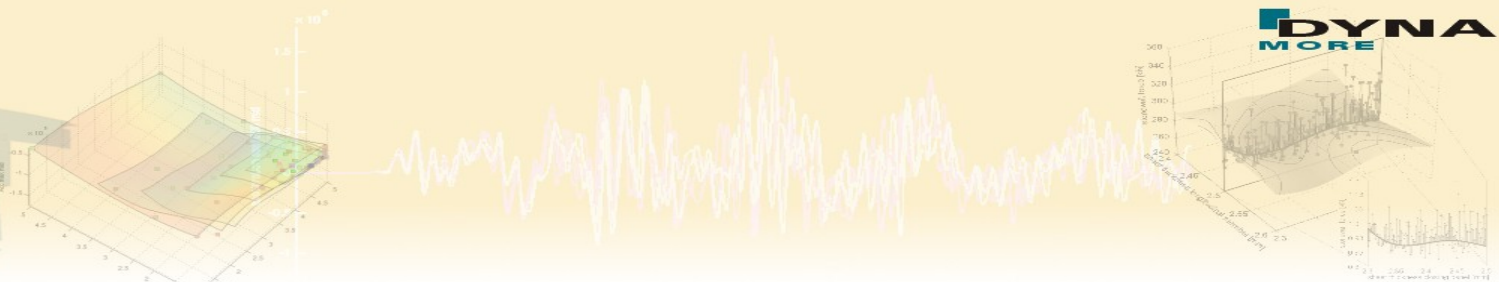
DYNAmore GmbH  
Industriestraße 2  
70565 Stuttgart  
<http://www.dynamore.de>



## Gliederung

- Einführung
- Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1
  - ANOVA
  - Korrelationsanalyse
  - Sobol-Indices
- Anwendungsbeispiel
- Zusammenfassung





## Sensitivitätsanalyse

- Abschätzung des Einflusses von Modellparametern auf Ergebnisgrößen  
→ Änderung der Systemantwort in Folge der Änderung einer Variable
- Identifikation signifikanter Größen
- Untersuchung des Einflusses von Streuungen
- Identifikation des funktionalen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ergebnisgrößen

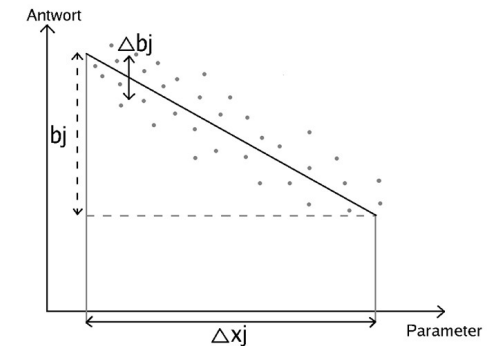
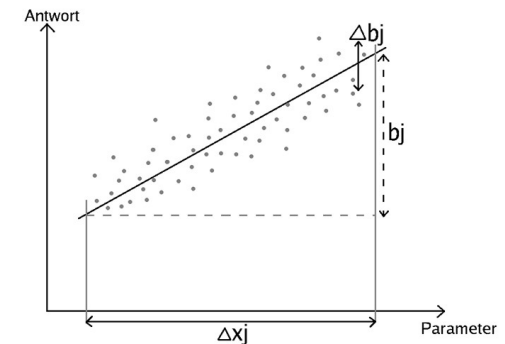
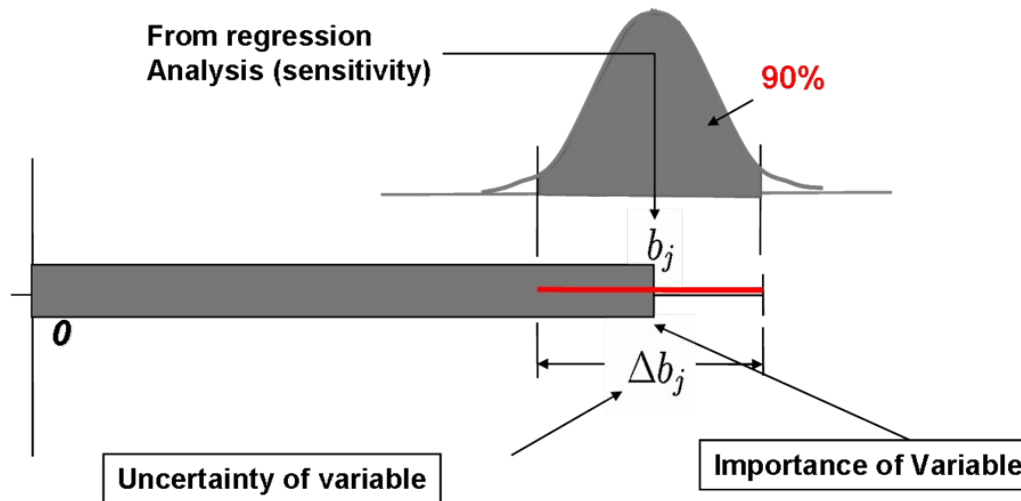
## LS-OPT

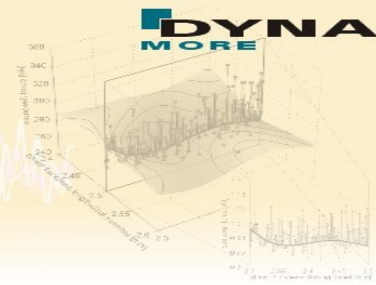
- bietet verschiedene Methoden zur Sensitivitätsanalyse
- erweiterter Funktionsumfang in der aktuellen Version 4.1

# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## ANOVA

- basierend auf Regressionsanalyse am linearen Ersatzmodell
  - Regressionskoeffizient  $b_j$
  - Streuung  $\Delta b_j$





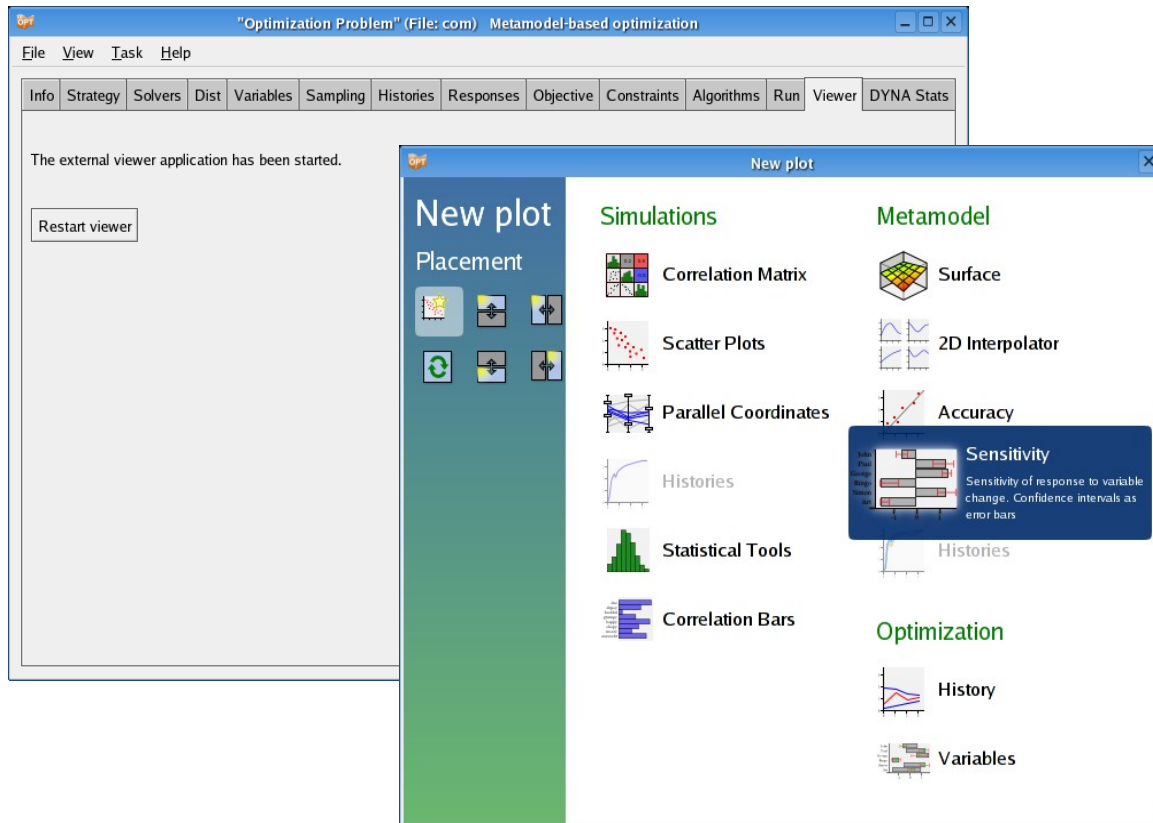
## ANOVA

- Ergebnisse
  - Änderung einer Antwortgröße in Folge der Änderung einer Variable
    - Gesamtänderung im Designraum (Absolutwert)
    - Aussage über die Richtung des Zusammenhangs (Vorzeichen)
  - Streuung der Antwortgrößen bezogen auf das lineare Ersatzmodell
    - varianzbasierte Auswertung des Konfidenzintervalls

# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## ANOVA

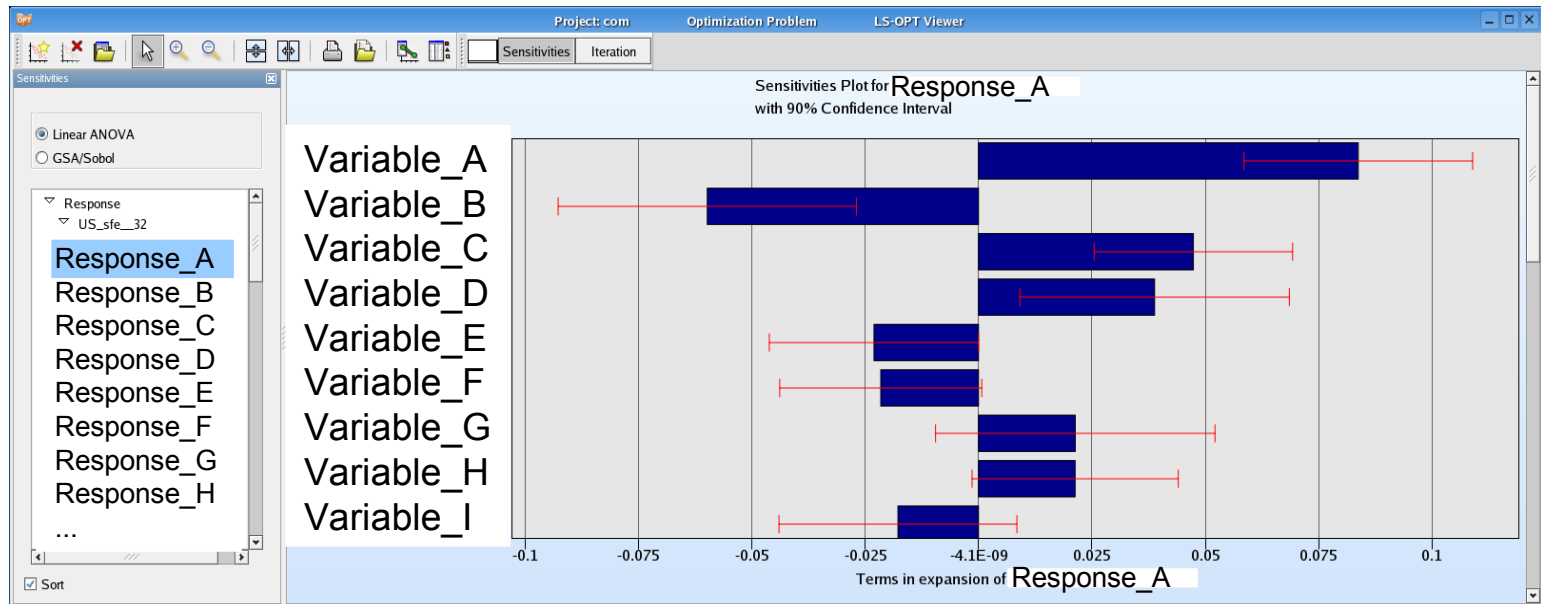
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## ANOVA

- Visualisierung in LS-OPT 4.1

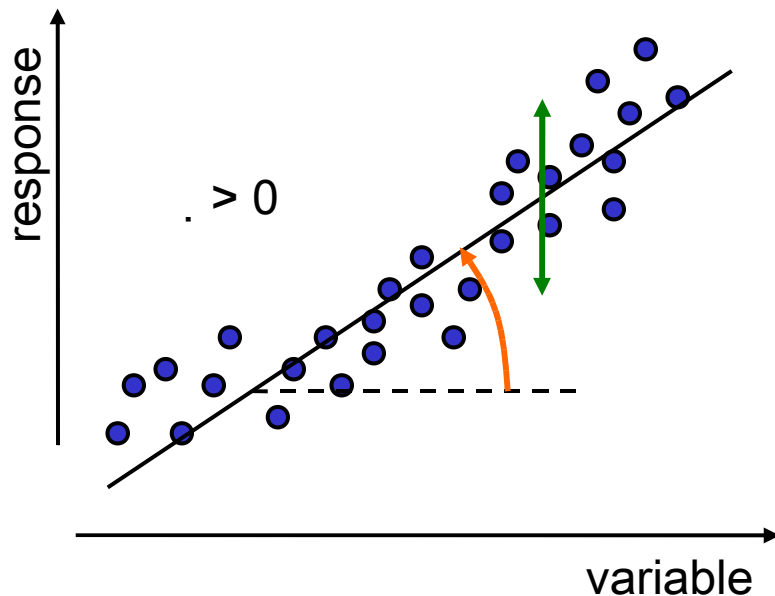




# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Korrelationsanalyse

- Ergebnisse
  - Änderung einer Antwortgröße in Folge der Änderung einer Variable  
→ Anstieg des linearen Ersatzmodells
  - Streuung der Antwortgrößen bezogen auf das lineare Ersatzmodell



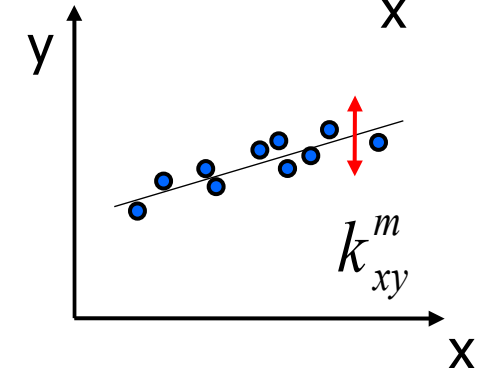
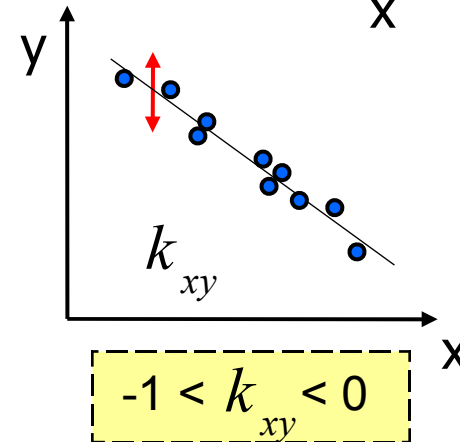
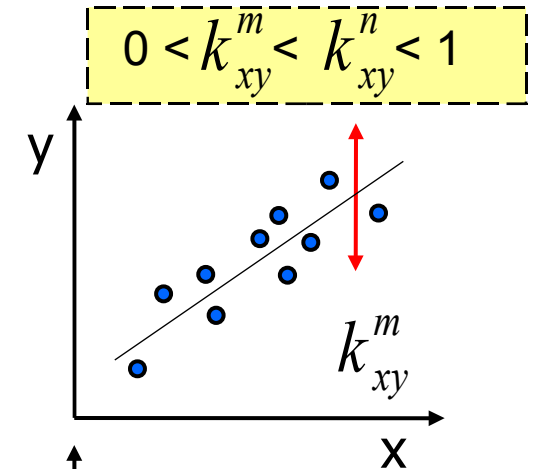
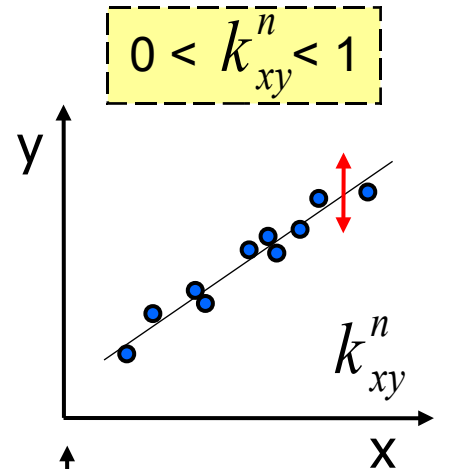
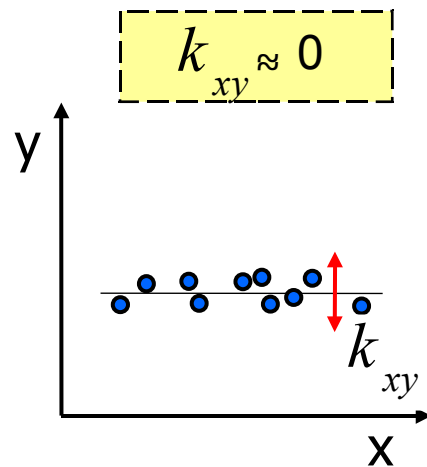
$$k_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$-1 \leq k_{xy} \leq 1$$



## Korrelationsanalyse

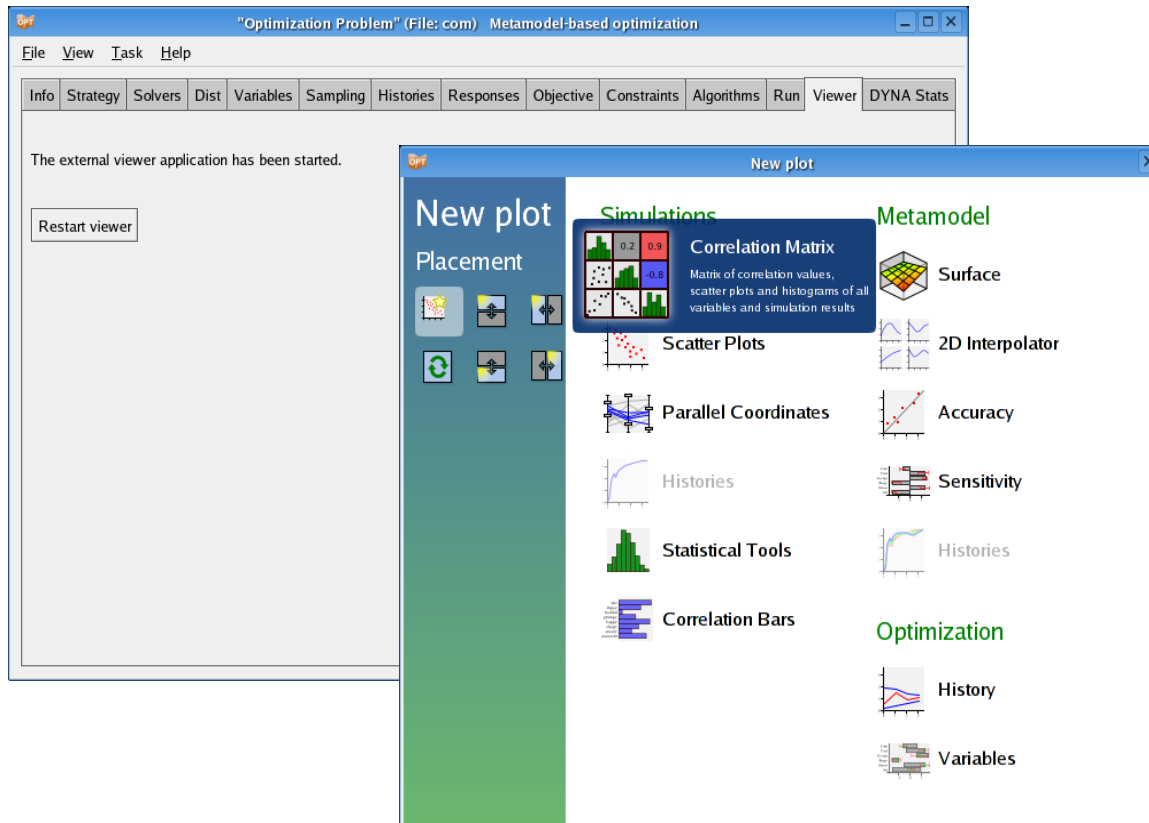
- Korrelationskoeffizient



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Korrelationsanalyse

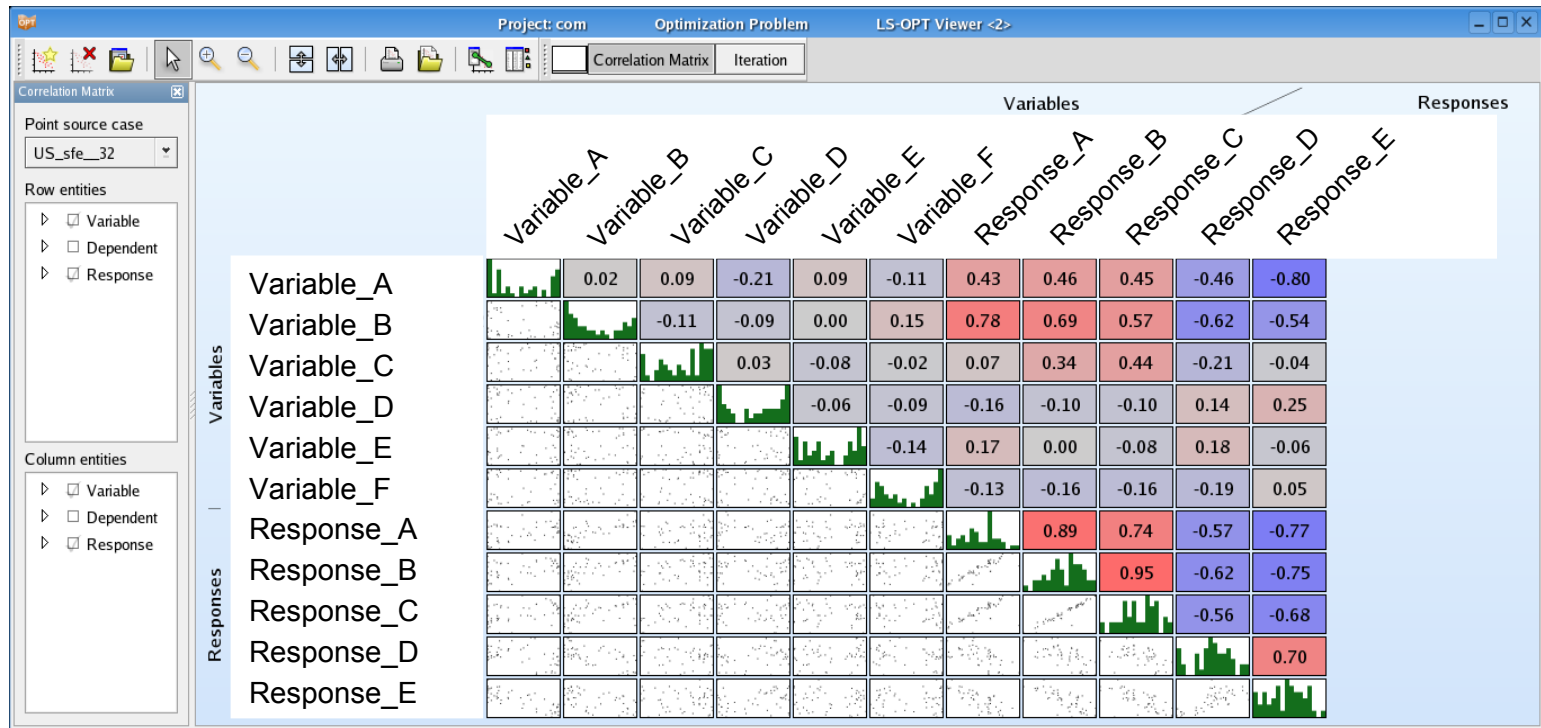
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Korrelationsanalyse

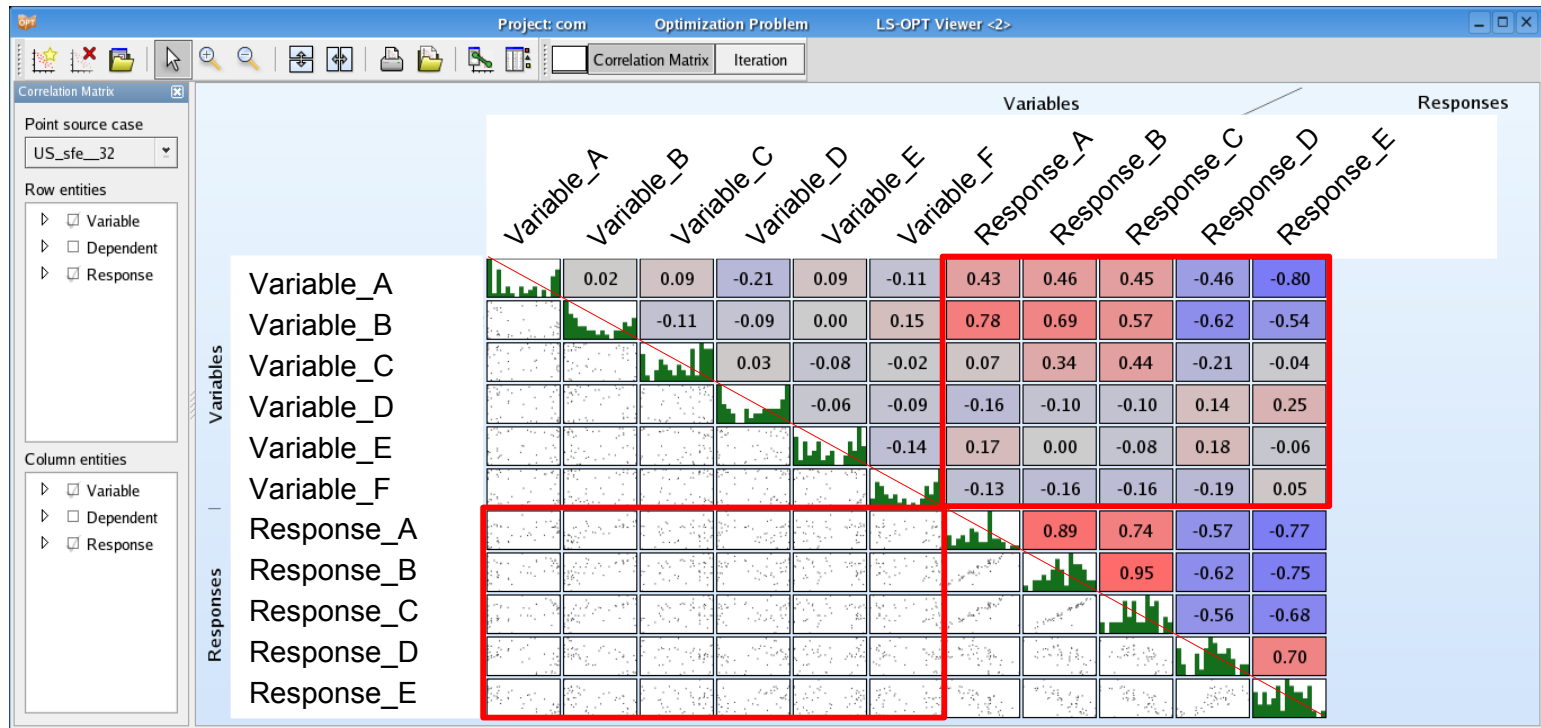
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Korrelationsanalyse

- Visualisierung in LS-OPT 4.1



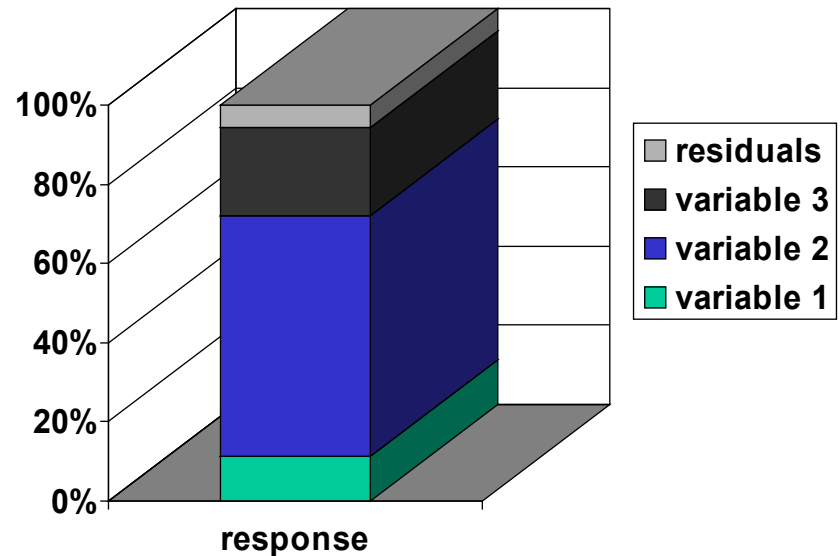
# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Sobol-Indices

- allgemeingültiges Mass für nichtlineare Sensitivitätsanalyse
- Berechnung aufwendig, es werden viele Auswertungspunkte benötigt  
 → nichtlineare Metamodelle (radial basis functions, neural networks, ...)

**Sobol-Index der Variable  $v_i$**

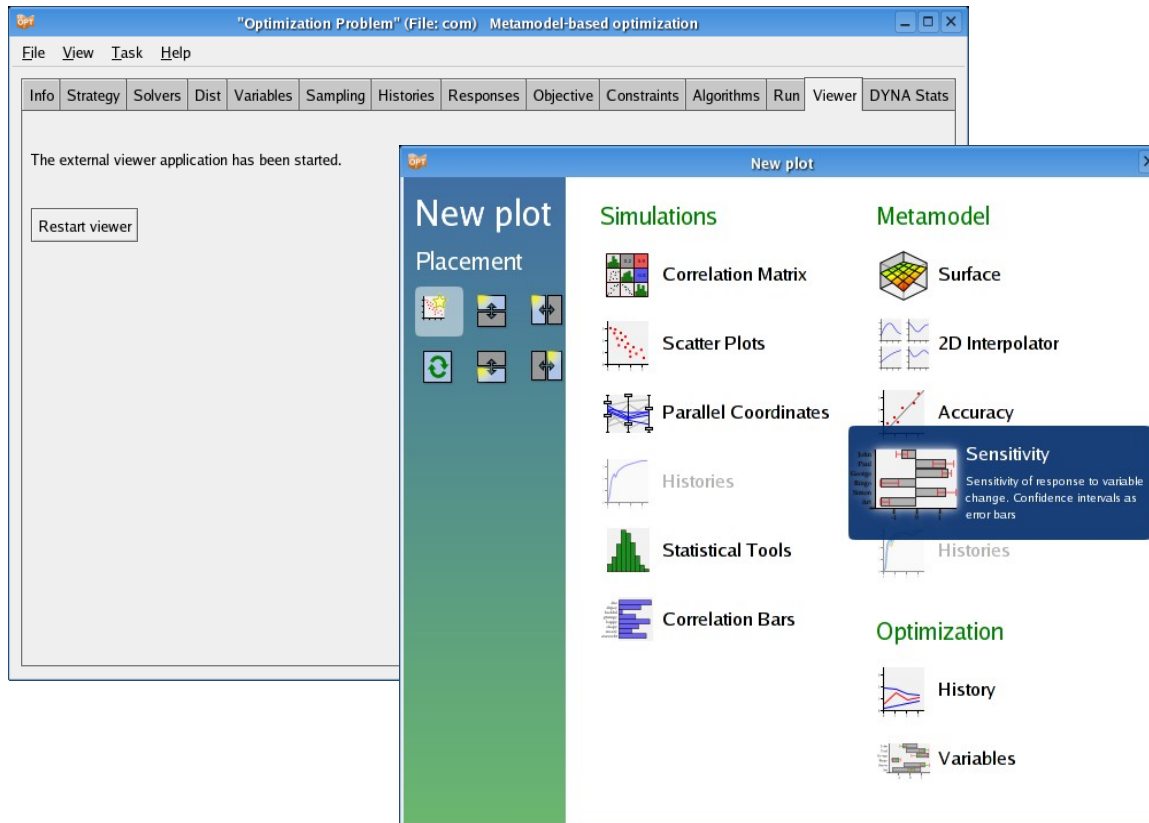
$$S_i = \frac{\text{Varianz in Folge } v_i}{\text{Gesamtvarianz der Antwortgröße}}$$



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Sobol-Indices

- Visualisierung in LS-OPT 4.1

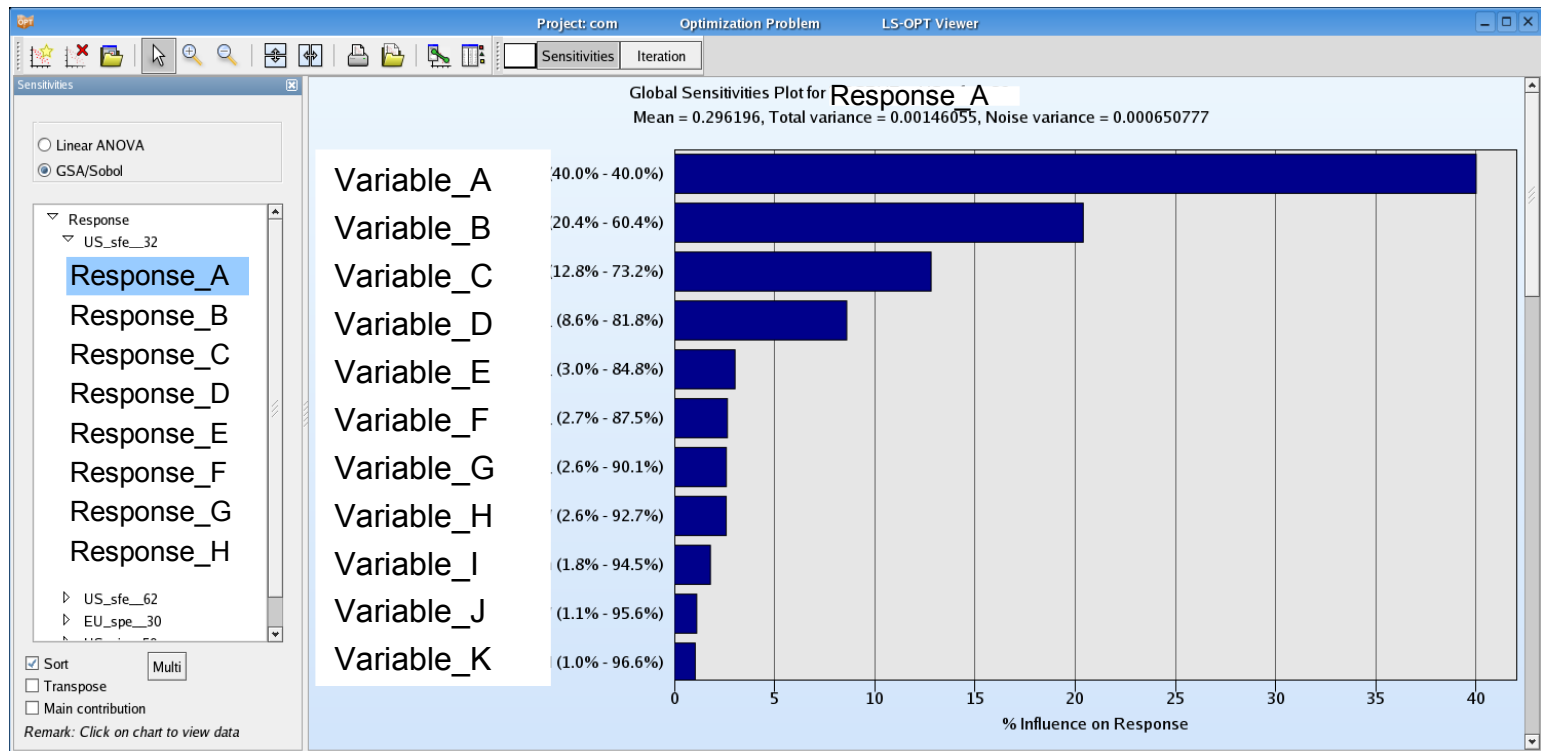




# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Sobol-Indices

- Visualisierung in LS-OPT 4.1

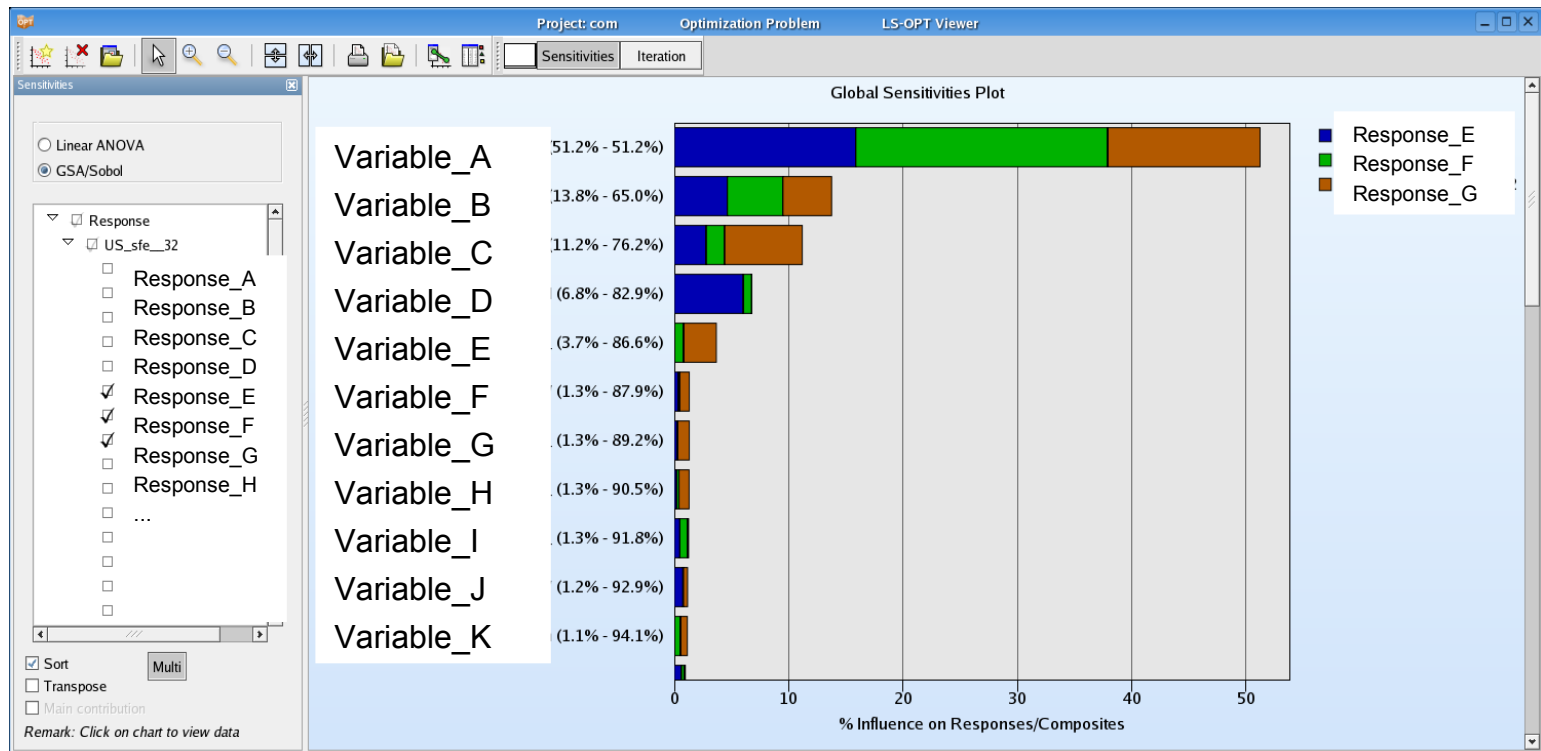




# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Sobol-Indices

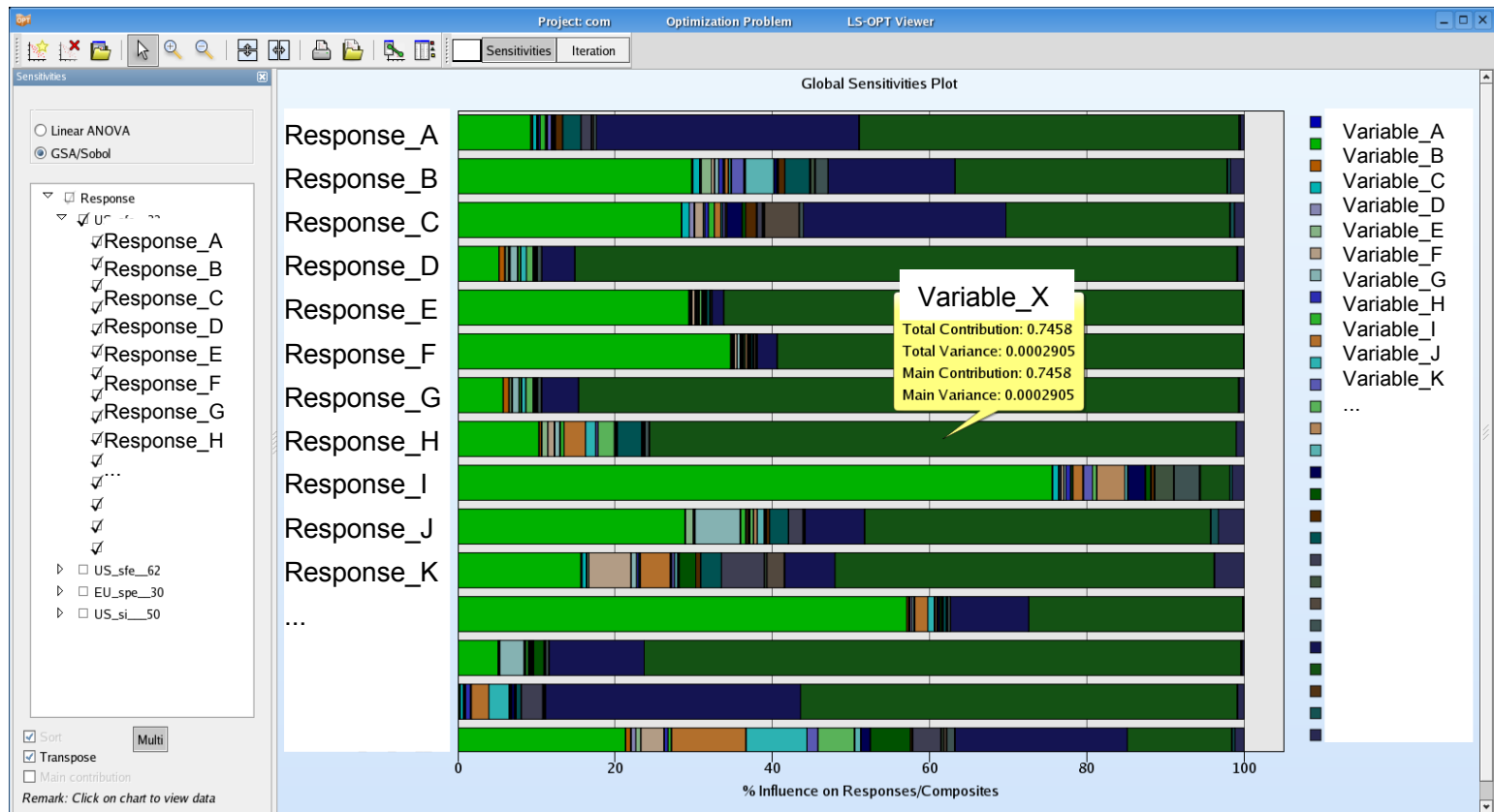
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



# Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

## Sobol-Indices

- Visualisierung in LS-OPT 4.1



# Anwendungsbeispiel

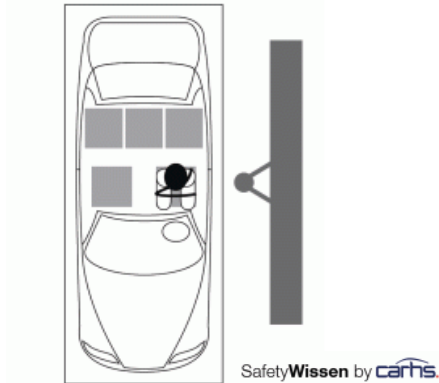
## Aufgabenstellung

- Parameterstudie im Insassenschutz
- Sensitivitätsuntersuchung mittels linearer und nichtlinearer Methoden
  - Identifikation relevanter Parameter
  - Zusammenfassung, Gegenüberstellung der Sensitivitätsmaße
  - stochastische Analyse, Robustheitsuntersuchung
  - Vergleich, Bewertung unterschiedlicher Methoden
  - Systematisierung der Betrachtung, Prozessintegration

# Anwendungsbeispiel

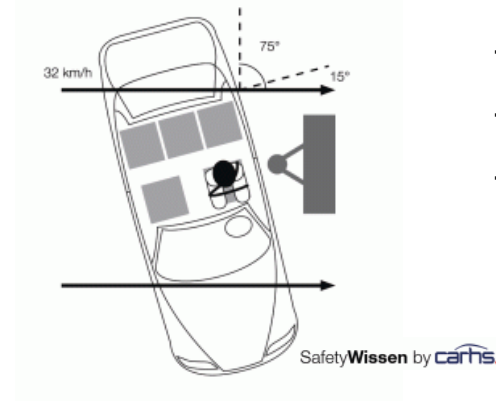
## Lastfälle

### EuroNCAP Pfahl



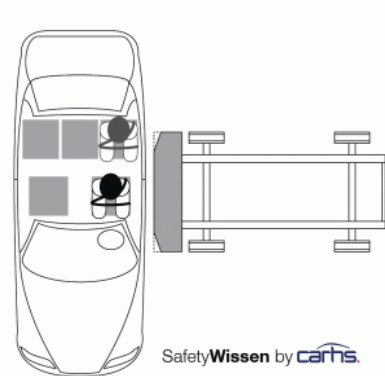
- Pfahl 90°
- 30 km/h
- EuroSID2

### FMVSS 214 Pfahl ES2



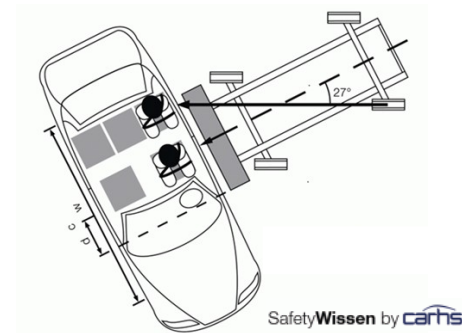
- Pfahl 75°
- 32 km/h
- ES-2re

### IIHS



- Barriere 90°
- 50 km/h
- 2x SID2 BLC

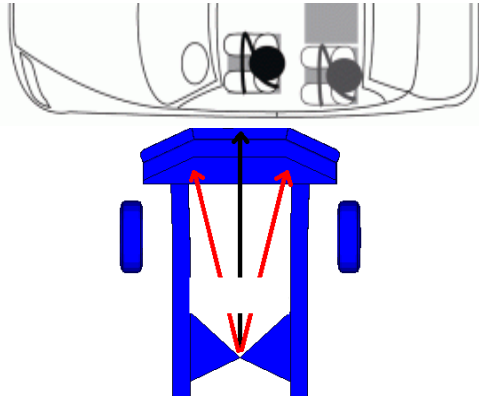
### US-SINCAP Barriere



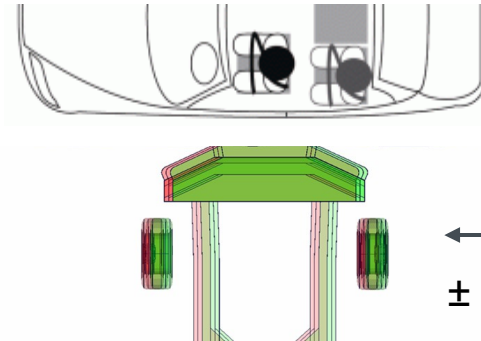
- Barriere 27°
- 62 km/h
- ES-2re
- SID2 BLD

# Anwendungsbeispiel

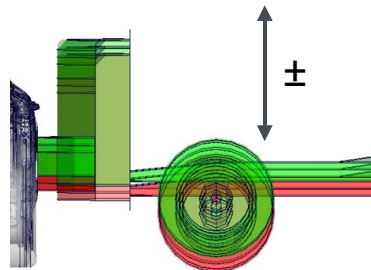
## Parameter: Bewegungsrichtung und Position Barriere/Pfahl



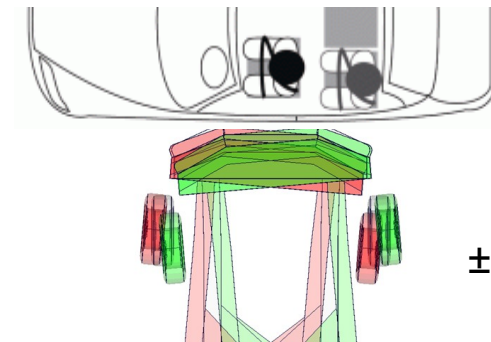
Bewegungsrichtung Barriere/Pfahl



Translation Barriere/Pfahl in x



Translation Barriere in z



Rotation Barriere um z

# Anwendungsbeispiel

## weitere Parameter

- Materialstärken – Rohbau
  - B-Säule
  - Türbrüstung
  - Schweller, ...
- Materialstärken – Verkleidung
  - B-Säule
  - Türbrüstung
  - Armlehne, ...
- Reibung
  - Dummy - Sitz, Türverkleidung, Mittelkonsole, B-Säule

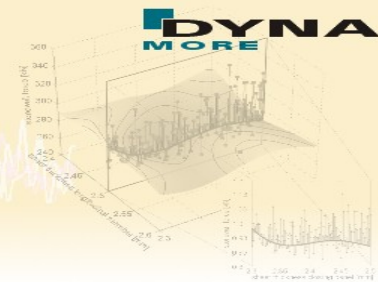


# Anwendungsbeispiel

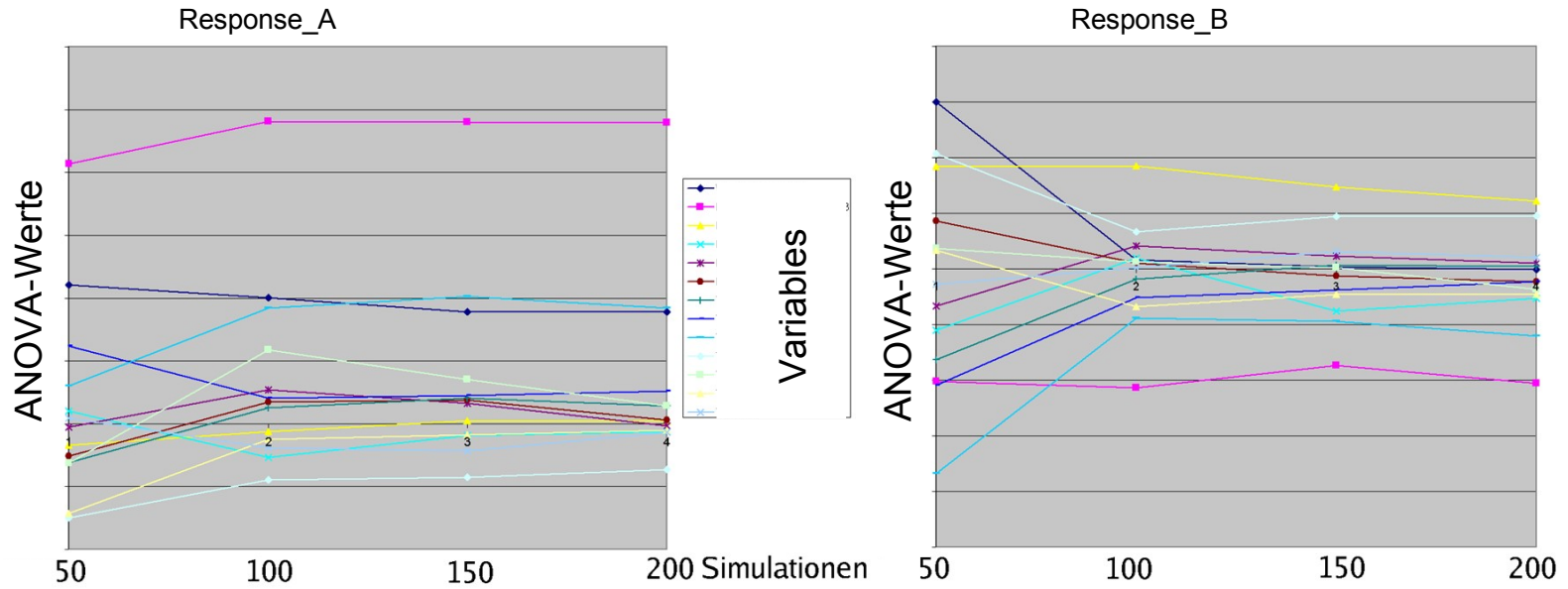
## Modellaufbau und Berechnung

- Anzahl der Parameter:
  - 2 Barrierenparameter für Pfähle, 4 für Barrieren
  - 4 Reibparameter
  - 19 Materialstärken für US-Lastfälle, 18 für EuroNCAP
  - EuroNCAP: 24, FMVSS 214: 25, US-SINCAP und IIHS: 27
- Parametrisierung und Modellaufbau mit CAx Loadcase Composer
- Parameterstudie in LS-OPT 4.1
  - pro Lastfall 200 Rechnungen in 4 Iterationen → Konvergenzuntersuchung
  - Verteilung, Sampling „D-Optimal“
  - Ersatzmodell: polynomial linear und radial basis function
  - Standardauswertung von Dummywerten (z.B. HIC, Rippenintrusion, ...)
  - für jede Ausgabegröße 200 Punkte im n-dimensionalen Raum
  - Auswertung von ANOVA, Korrelation und Sobol-Indices





## Konvergenzuntersuchung

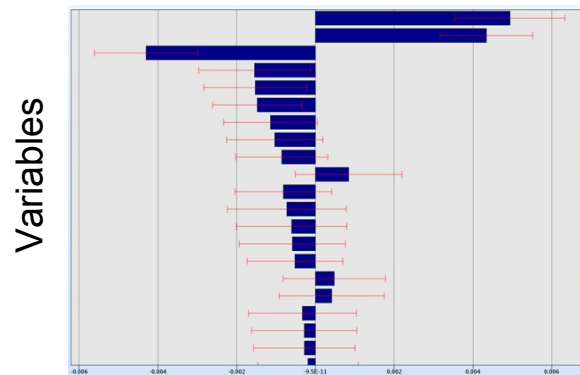


- 4 Iterationen mit je 50 Simulationen
  - große Änderungen zwischen 50 und 100 Simulationen
  - über 100 Simulationen nur noch geringe Änderungen
- aber: Anzahl der Simulationen abhängig von Anzahl der Parameter

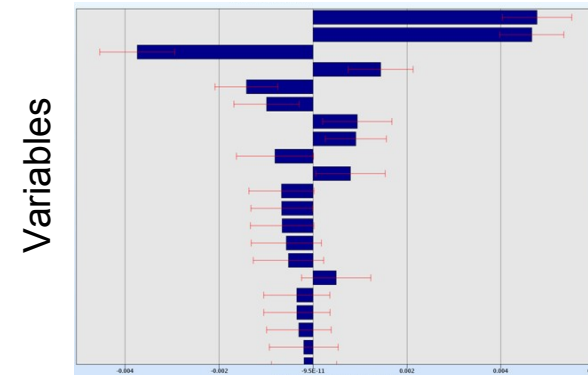
# Anwendungsbeispiel

## Konvergenzuntersuchung

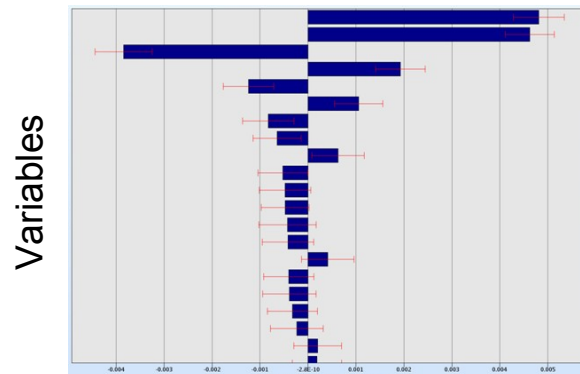
50 Punkte



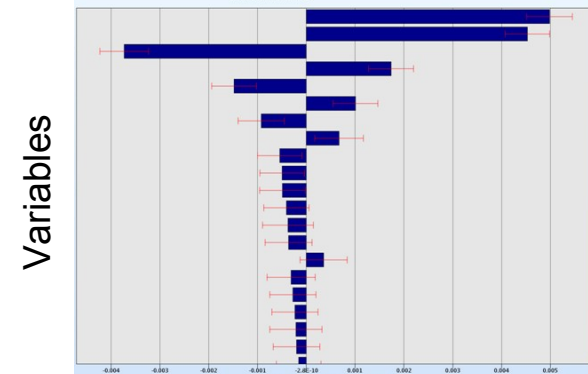
100 Punkte



150 Punkte

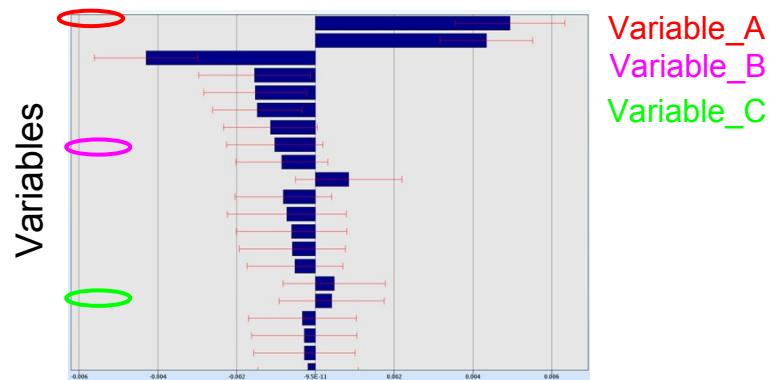


200 Punkte

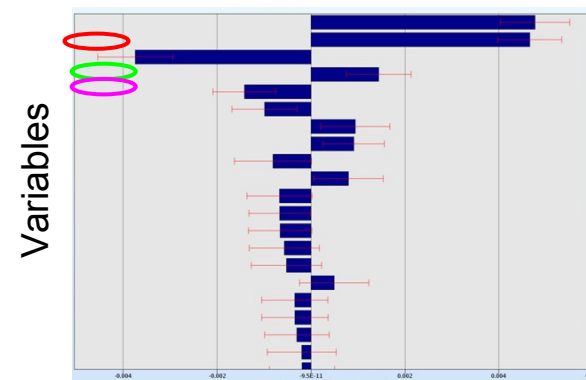


## Konvergenzuntersuchung

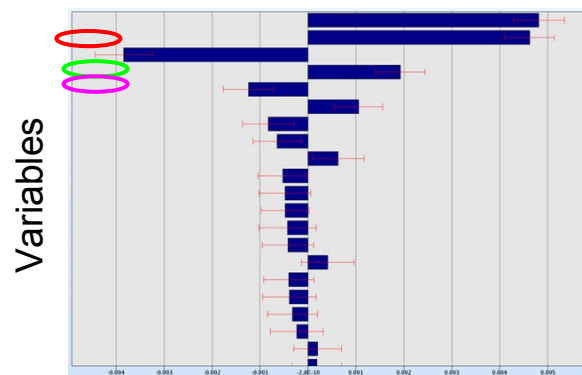
50 Punkte



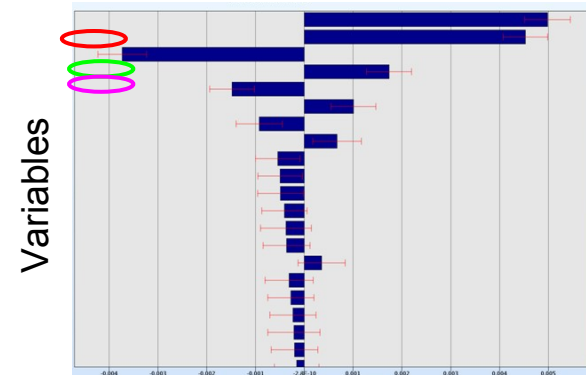
100 Punkte



150 Punkte

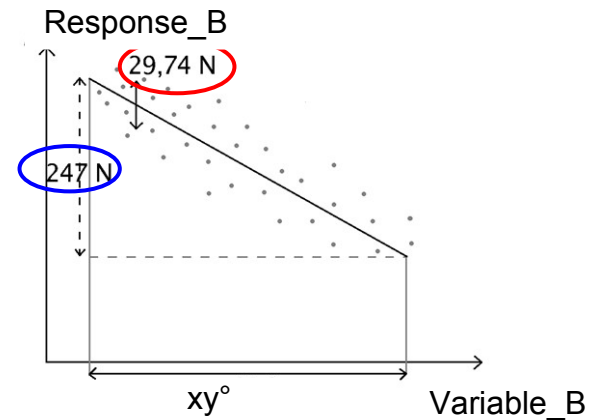
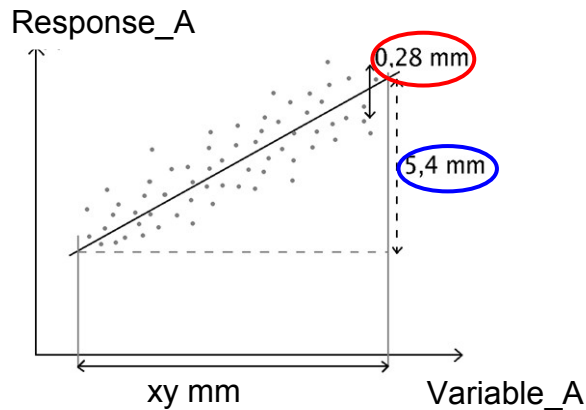
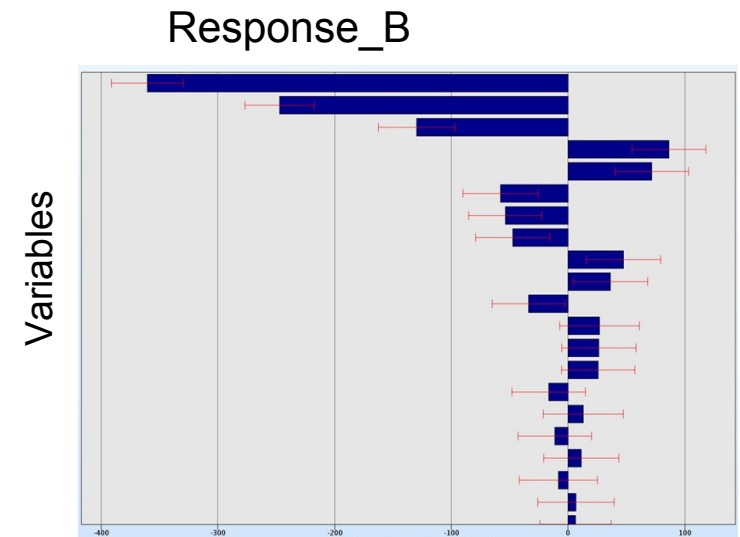
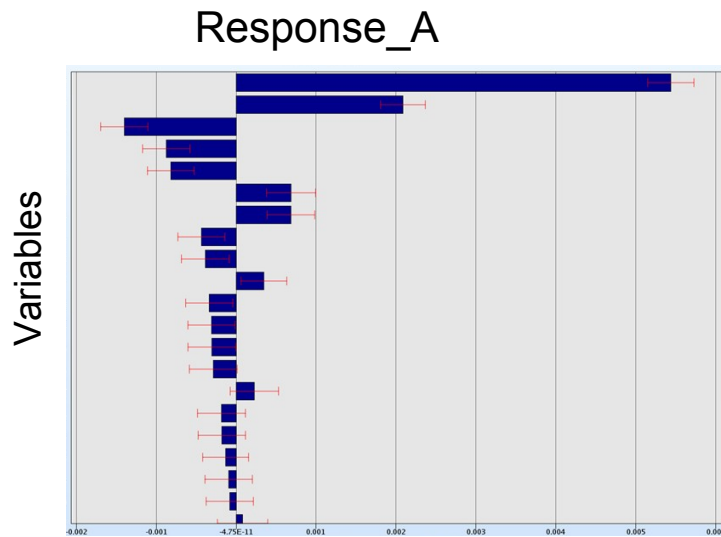


200 Punkte



# Anwendungsbeispiel

## Ergebnisse ANOVA





## Ergebnisse ANOVA

- Problem: Werte nicht vergleichbar
- Normierung auf Grenzwerte des jeweiligen Lastfalls
- mittlerer Einfluss eines Parameters auf alle Ergebnisgrößen
- Bsp: Variable\_A ändert Response\_A um 25 mm, Response\_B um 100 N

Normierung auf Grenzwerte:

Lastfall\_A: Response\_A\_max = 50 mm, Response\_B\_max = 1000 N

Response\_A:  $25 / 50 = 0,5 = 50 \%$ , Response\_B:  $100 / 1000 = 0,1 = 10 \%$

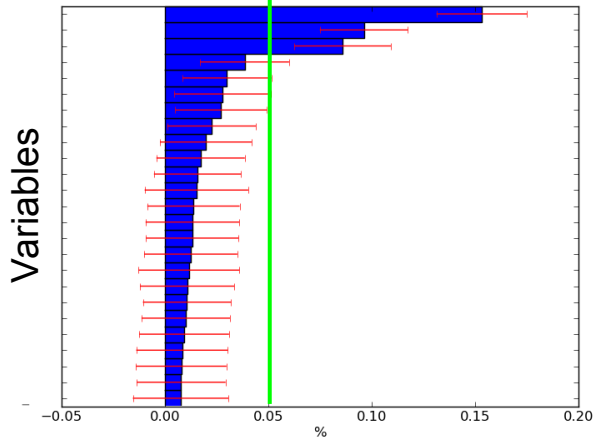
Gesamt:  $(0,5 + 0,1) / 2 = 0,3 = 30 \%$

- bezogen auf die jeweiligen Grenzwerte beträgt die mittlere Änderung der Ergebnisgrößen im Lastfall\_A 30 % durch Änderung der Variable\_A

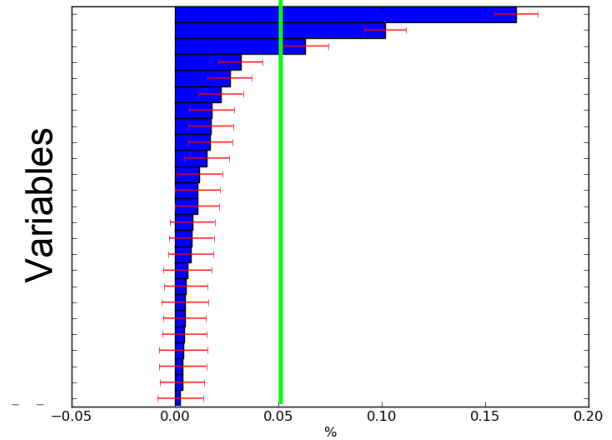
# Anwendungsbeispiel

## Ranking ANOVA

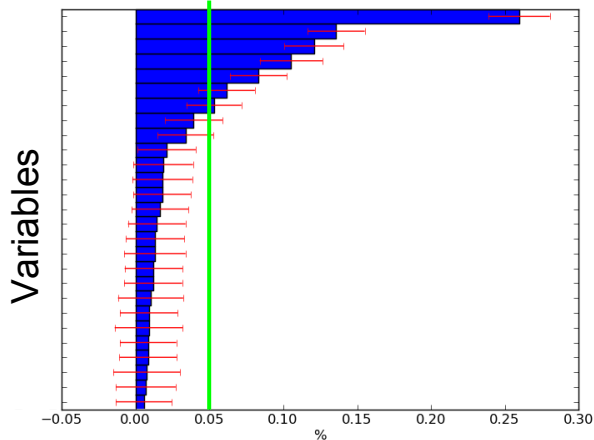
EuroNCAP Pfahl



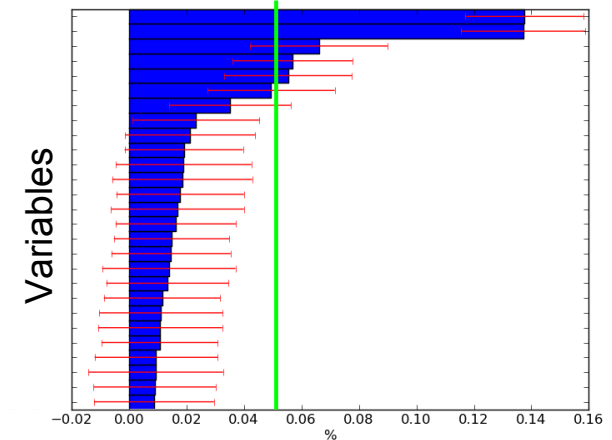
FMVSS 214 Pfahl ES2



IIHS



US-SINCAP Barriere

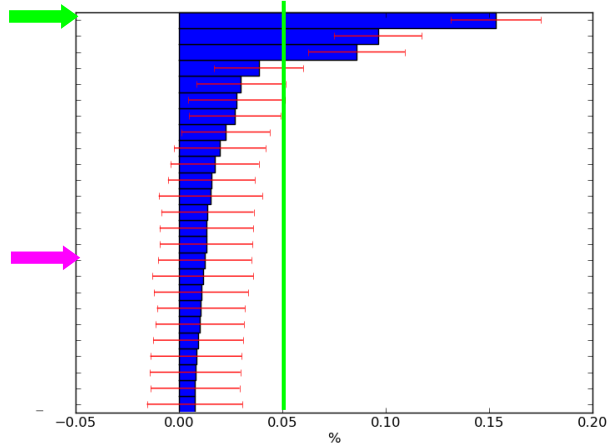




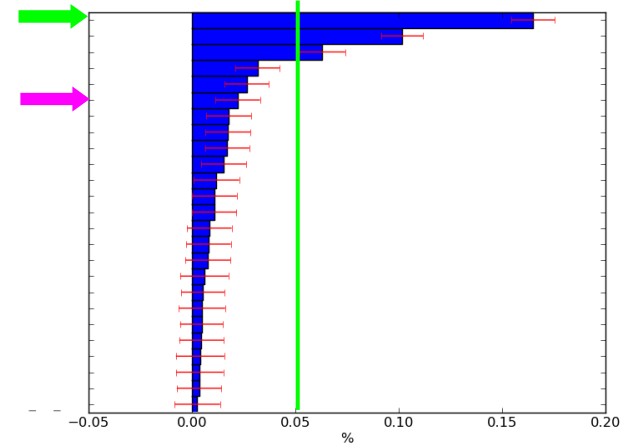
# Anwendungsbeispiel

## Ranking ANOVA

EuroNCAP Pfahl

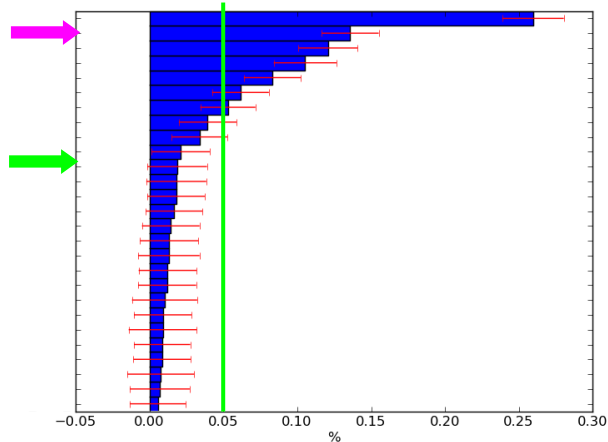


FMVSS 214 Pfahl ES2

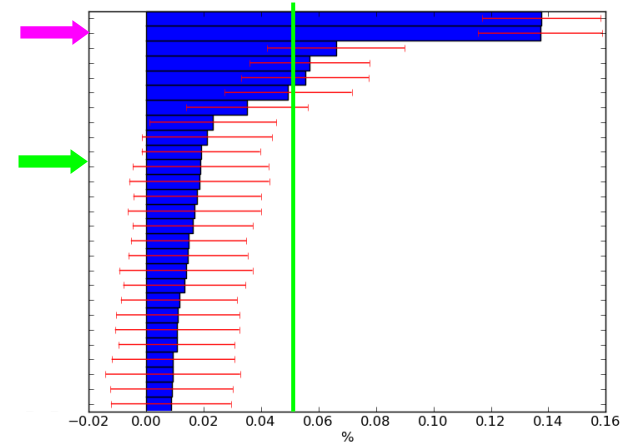


Variable\_A  
Variable\_B

IIHS



US-SINCAP Barriere

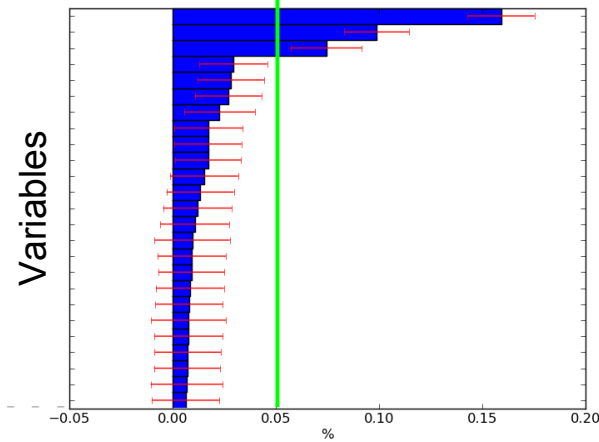




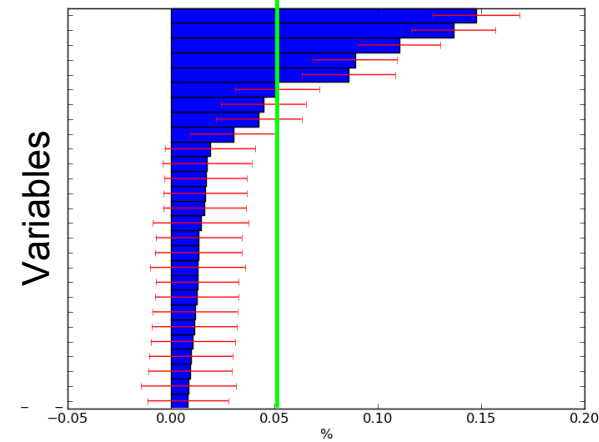
# Anwendungsbeispiel

## Ranking ANOVA

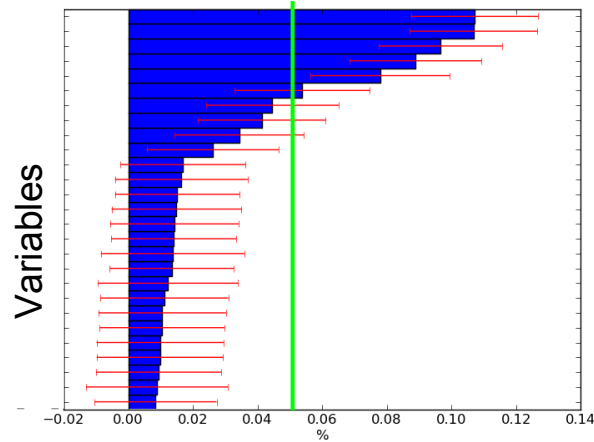
Pfahllastfälle



Barrierenlastfälle



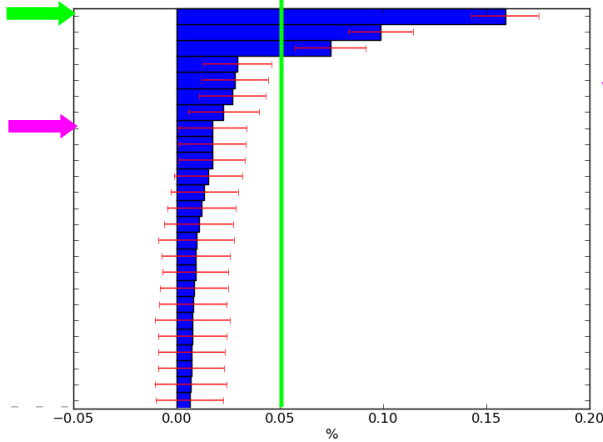
alle Lastfälle



# Anwendungsbeispiel

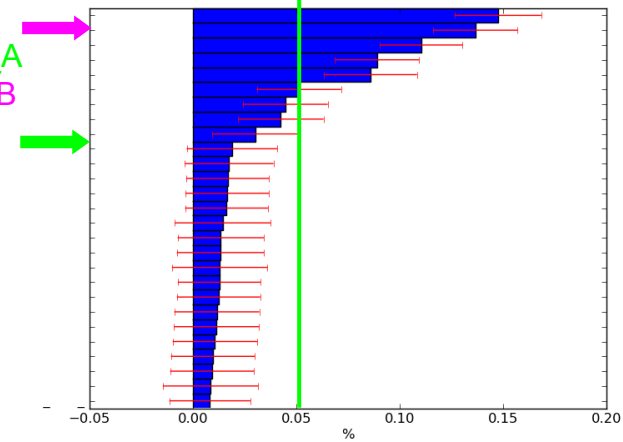
## Ranking ANOVA

Pfahllastfälle

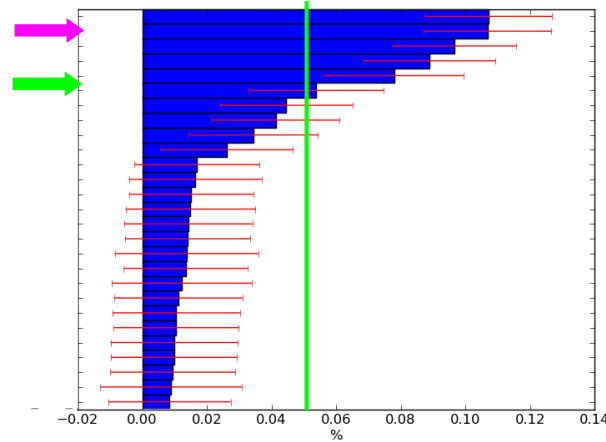


Barrierenlastfälle

Variable\_A  
Variable\_B



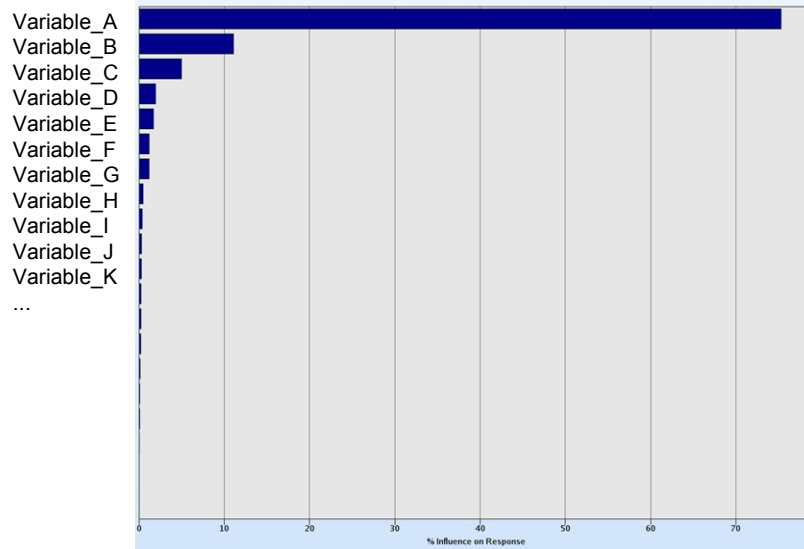
alle Lastfälle



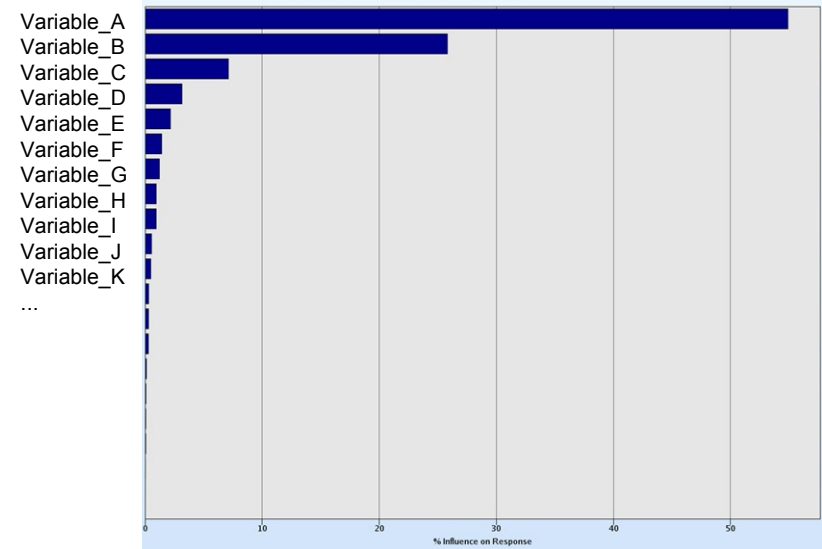
# Anwendungsbeispiel

## Ergebnisse Sobol

Response\_A



Response\_B

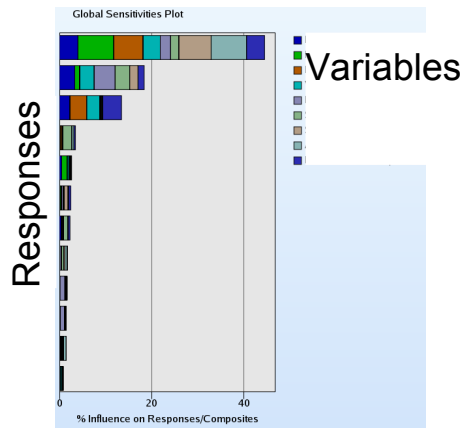


- Werte sind normiert und damit direkt vergleichbar
- Werte lassen sich im LS-OPT Viewer zusammenfassen

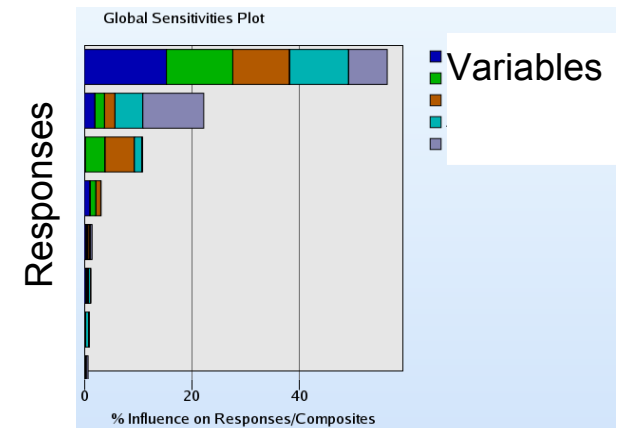
# Anwendungsbeispiel

## Ranking Sobol

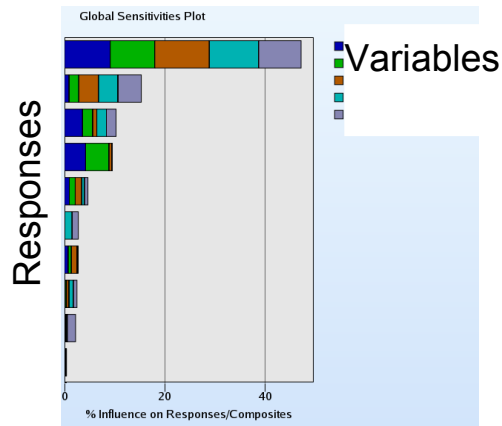
### EuroNCAP Pfahl



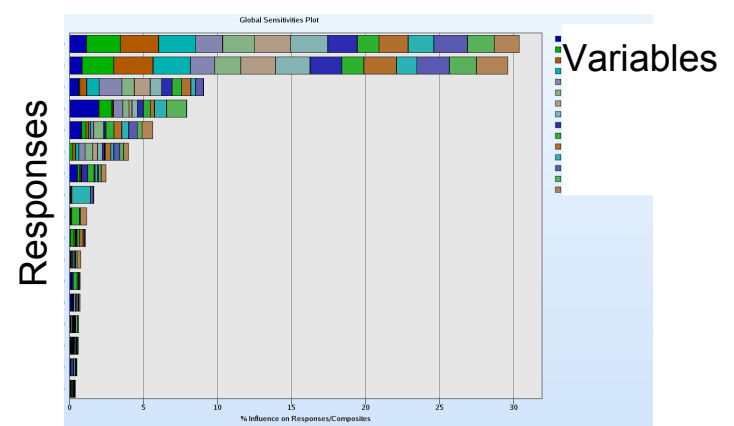
### FMVSS 214 Pfahl ES2



### IIHS



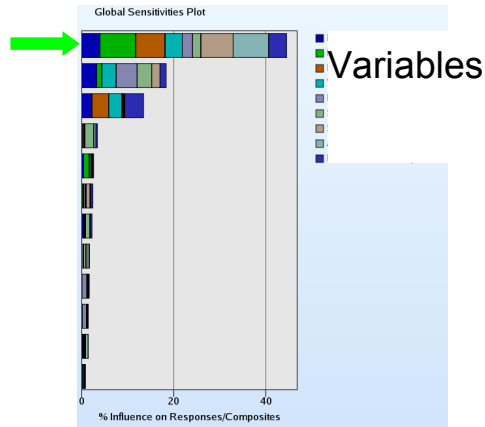
### US-SINCAP Barriere



# Anwendungsbeispiel

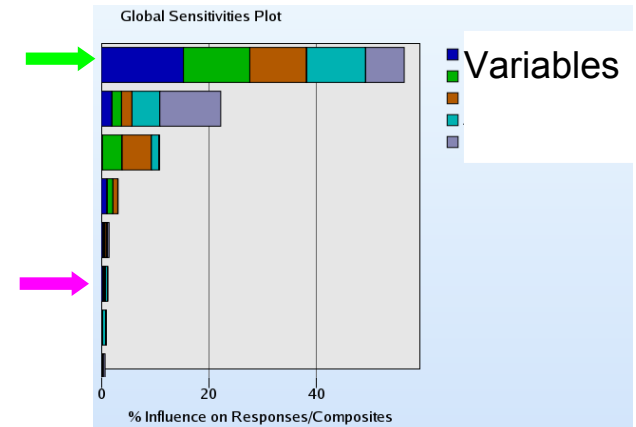
## Ranking Sobol

### EuroNCAP Pfahl

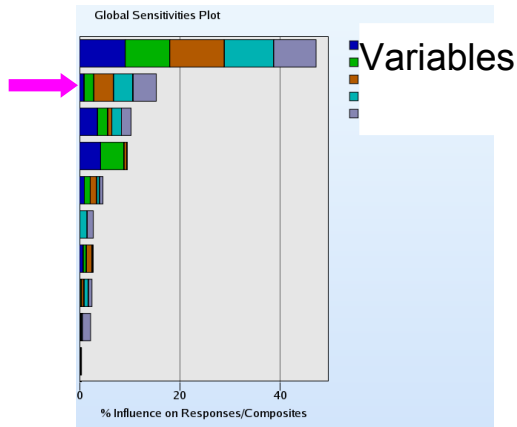


### FMVSS 214 Pfahl ES2

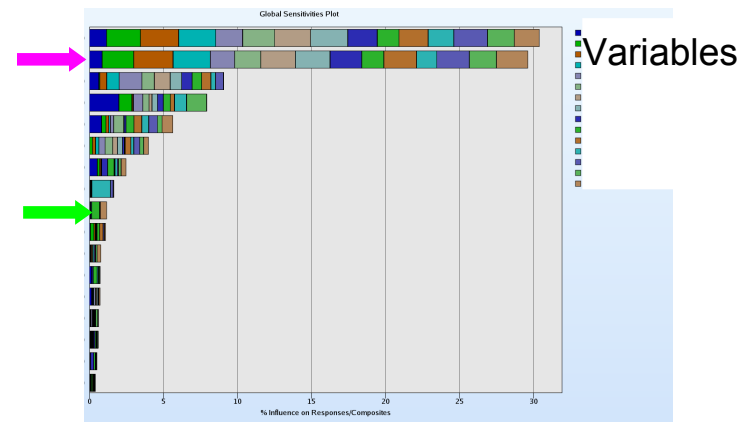
Variable\_A  
Variable\_B



### IIHS



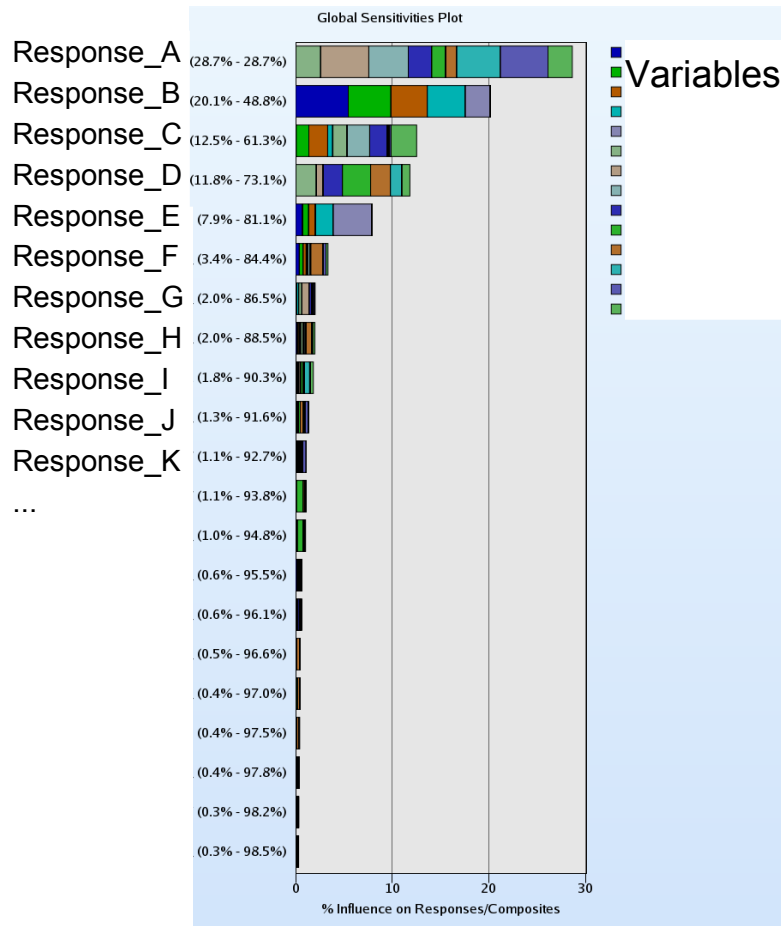
### US-SINCAP Barriere



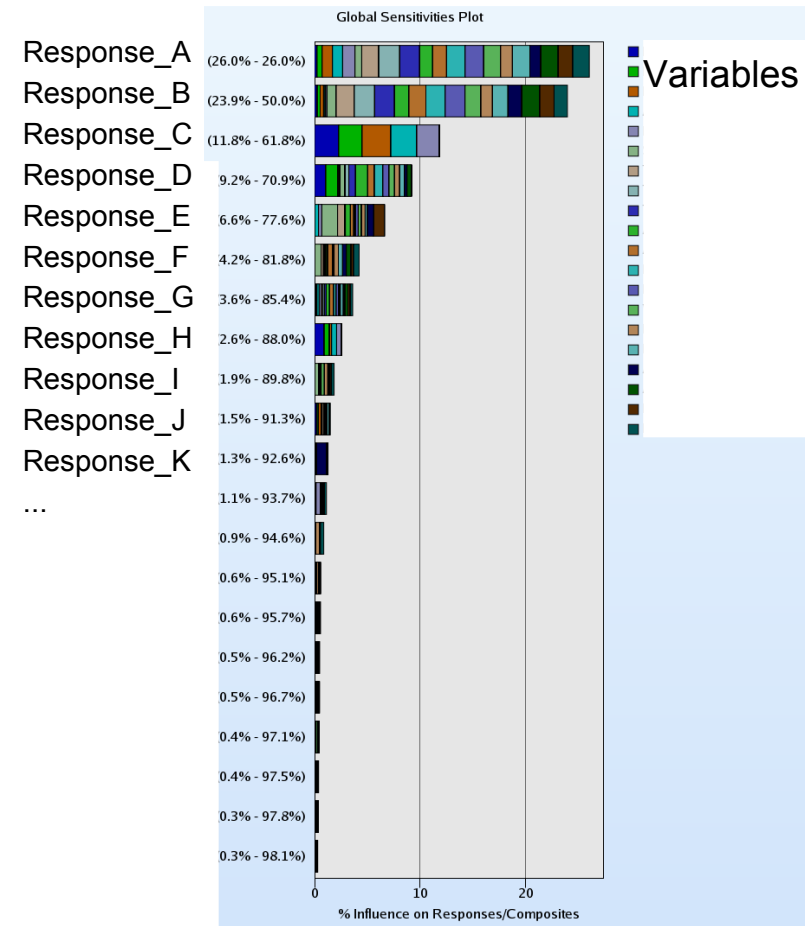
# Anwendungsbeispiel

## Ranking Sobol

### Pfähle



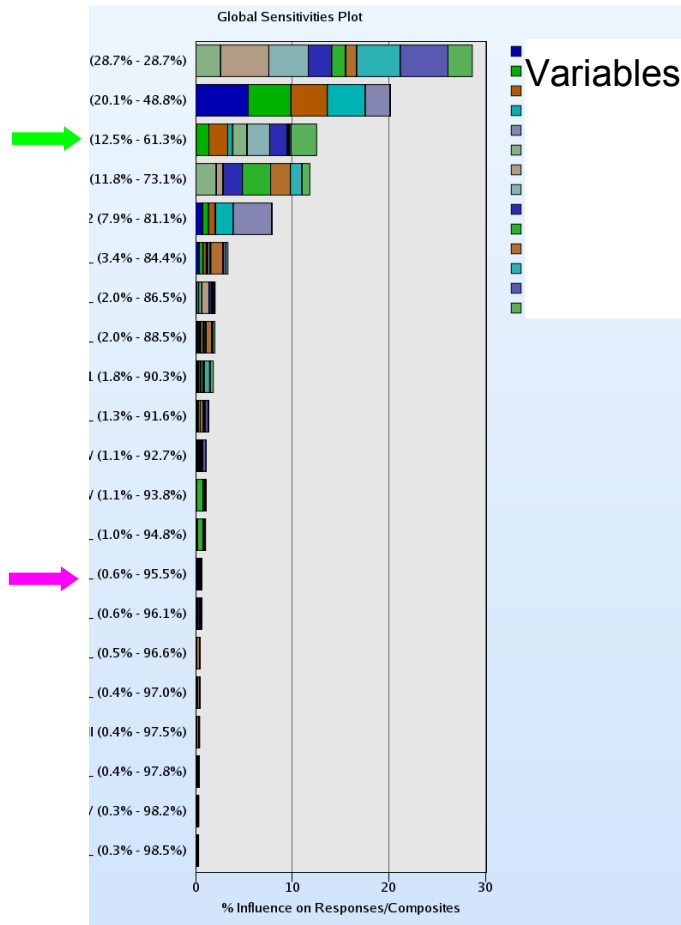
### Barrieren



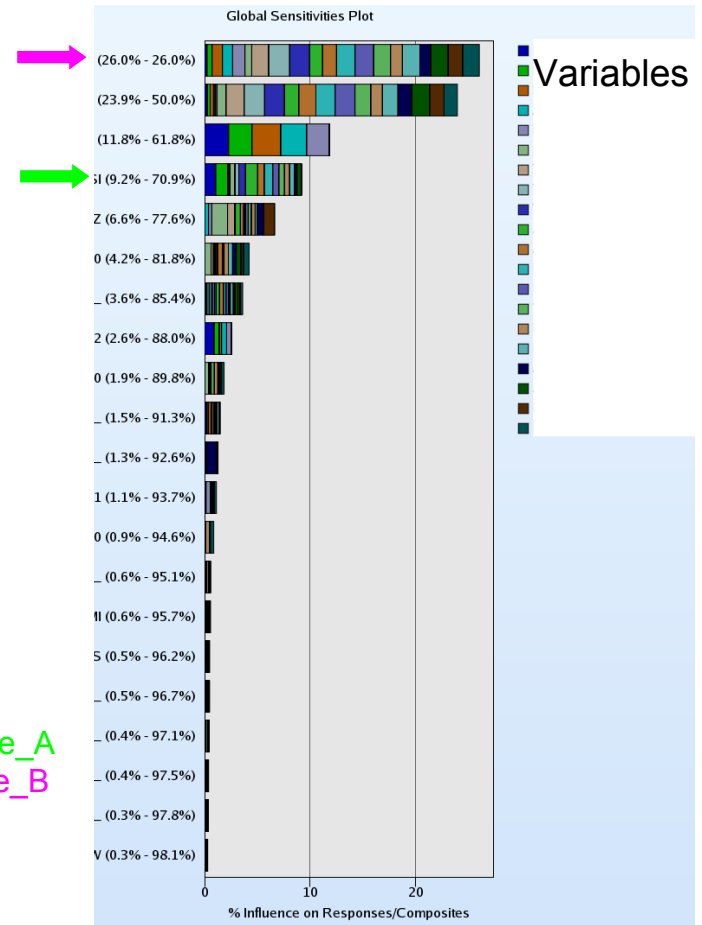
# Anwendungsbeispiel

## Ranking Sobol

### Pfähle



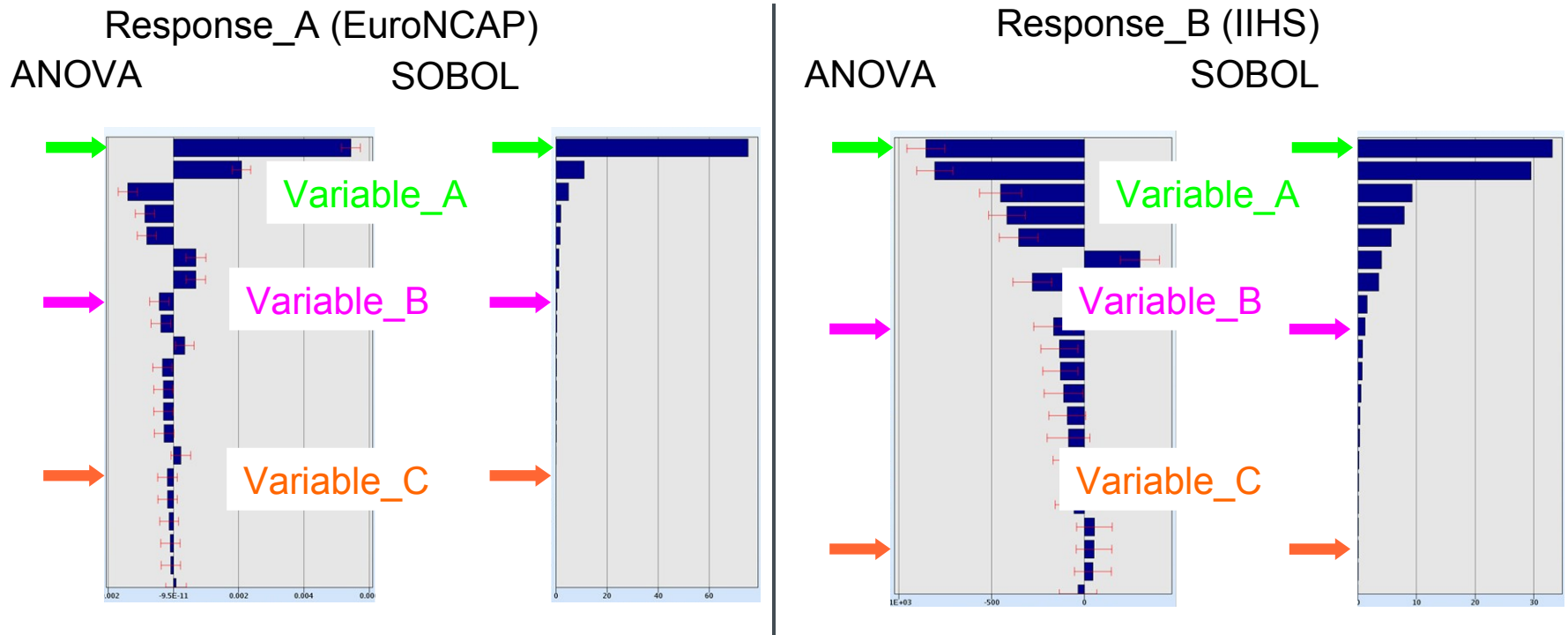
### Barrieren



Variable\_A  
Variable\_B



## Gegenüberstellung ANOVA – Sobol

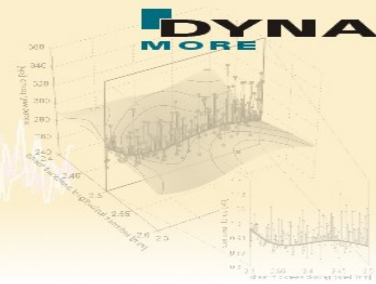


- Reihenfolge der Parameter beim Ranking identisch

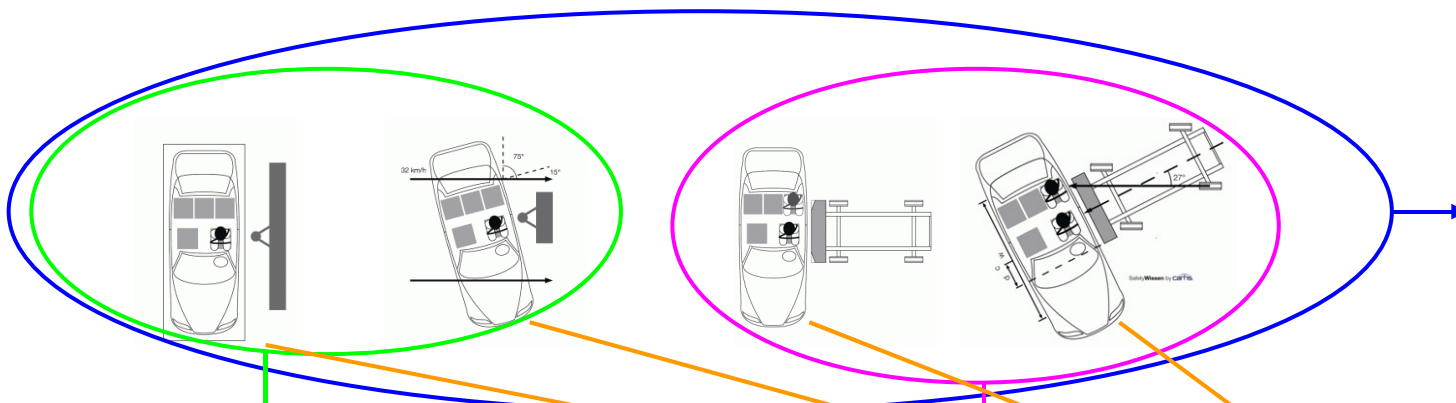
hier z.B: EuroNCAP: Response\_A

bzw. IIHS: Response\_B

# Anwendungsbeispiel



## Auswahl relevanter Parameter



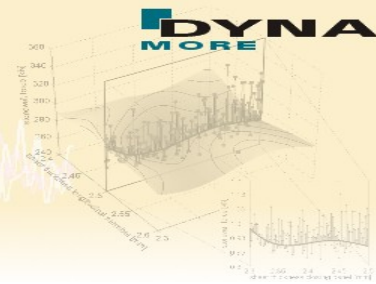
Variable\_F  
Variable\_A  
Variable\_E

Variable\_A  
Variable\_B  
Variable\_C  
Variable\_D  
Variable\_E  
Variable\_G

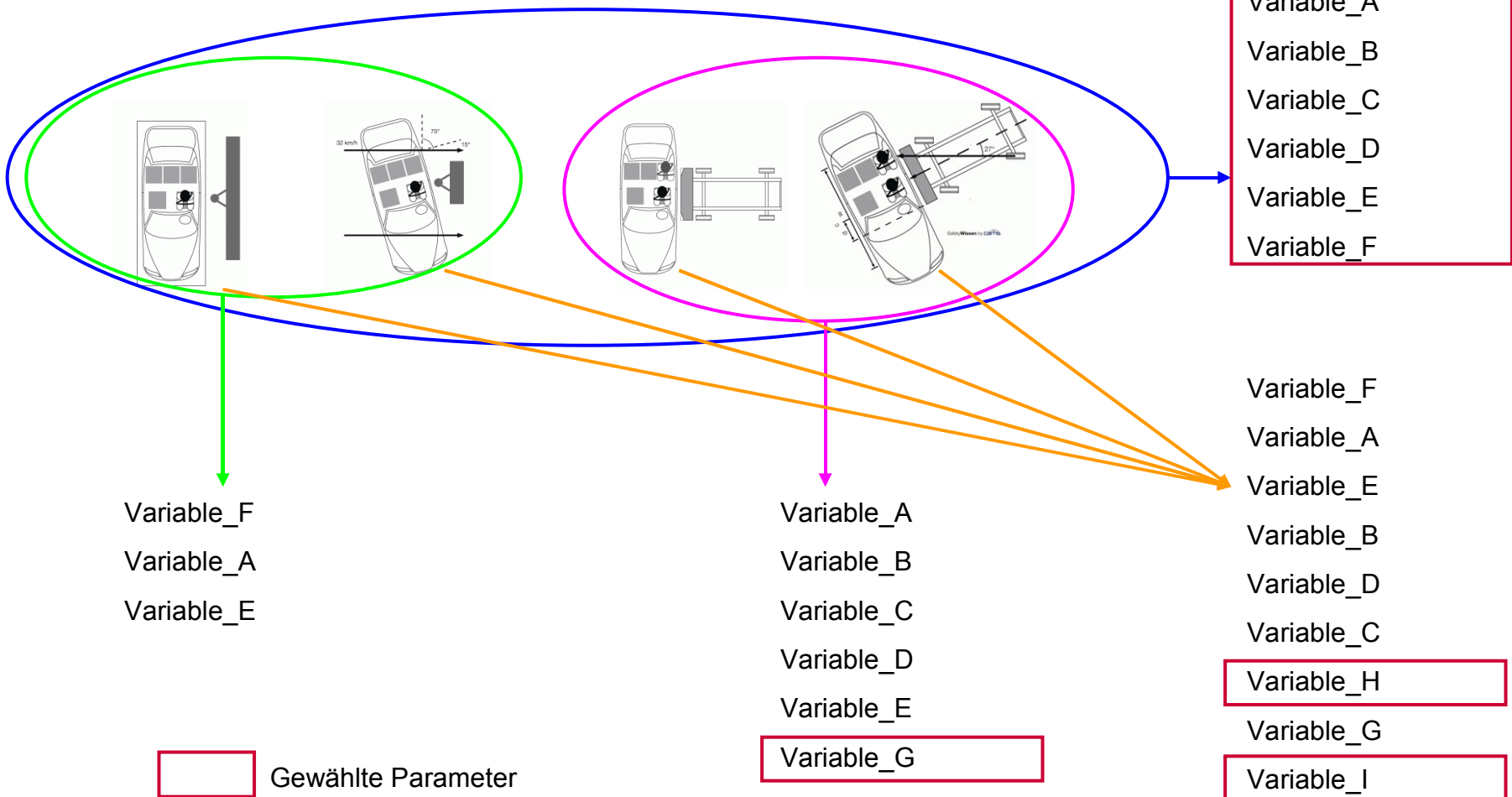
Variable\_A  
Variable\_B  
Variable\_C  
Variable\_D  
Variable\_E  
Variable\_F

Variable\_F  
Variable\_A  
Variable\_E  
Variable\_B  
Variable\_D  
Variable\_C  
Variable\_H  
Variable\_G  
Variable\_I

# Anwendungsbeispiel



## Auswahl relevanter Parameter



## Gegenüberstellung ANOVA - SOBOL

- ANOVA
  - + absolute Werte des Einflusses der Variablen im Designraum
  - + Vorzeicheninformation liefert Richtung des Zusammenhangs
  - Werte nicht direkt miteinander vergleichbar
    - Zusammenfassung über Normierung
- SOBOL
  - + Werte direkt miteinander vergleichbar
    - proz. Anteil an Gesamtvarianz, Summe = 1
  - + anwendbar für lineare und nichtlineare Modelle
  - keine Information über Richtung und Betrag des Zusammenhangs

# Zusammenfassung

## Anwendungsbeispiel

- Parameterstudie mit 4 Lastfällen im Insassenschutz
- Anzahl der ausgewählten Parameter je nach Lastfall 24-27
- Sensitivitätsanalyse mit LS-OPT 4.1

ANOVA und SOBOL liefern vergleichbare Bewertungen des Einflusses einzelner Parameter auf die Insassenwerte

- Konvergenzstudie → Anzahl notwendiger Läufe pro Lastfall

weitere Untersuchungen

- Dummypositionierung, Massenverteilung
- nichtlineare Sensitivitätsanalyse mit reduziertem Parametersatz
- Analyse der Gesamt- / Sternebewertung

# Zusammenfassung

## LS-OPT 4.1

- Methoden zur Sensitivitätenanalyse
  - ANOVA
  - Korrelationsanalyse
  - Sobol-Indices
- Sobol-Indices stellen den Einfluss der Variablen unabhängig von der Annahme eines linearen Zusammenhangs dar
- für aufwendige Simulationen, wie Crash, Insassenschutz oder Umformsimulation, wird die Auswertung der Sobol-Indices auf einem Metamodell durchgeführt
- unabhängig von der gewählten Methode ist die Visualisierung wesentlich für die Interpretation und das Verständnis der Ergebnisse





**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

