



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

Gordon Geißler

Anja Förderer (Uni Karlsruhe)

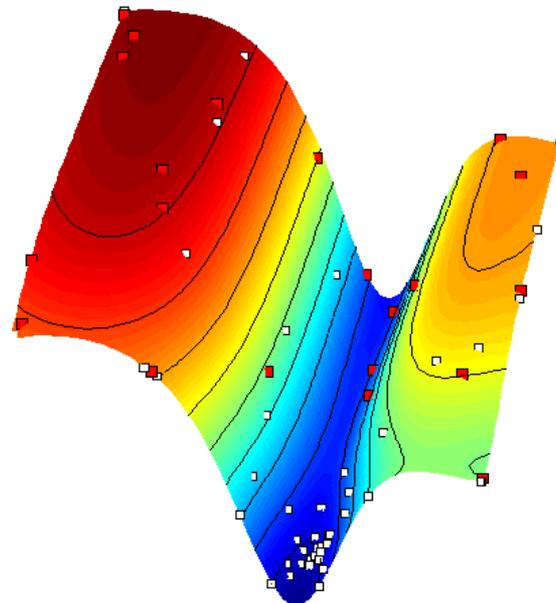
Björn Hohage (Audi)

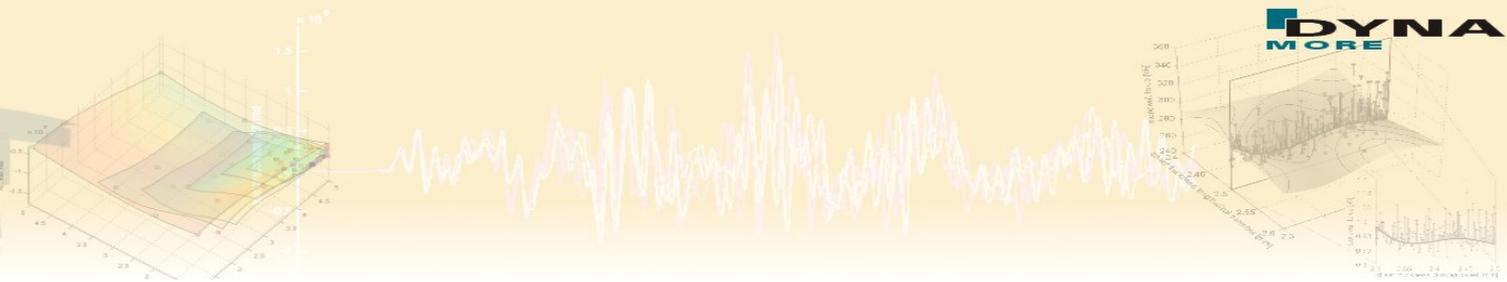
DYNAmore GmbH
Industriestraße 2
70565 Stuttgart
<http://www.dynamore.de>



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

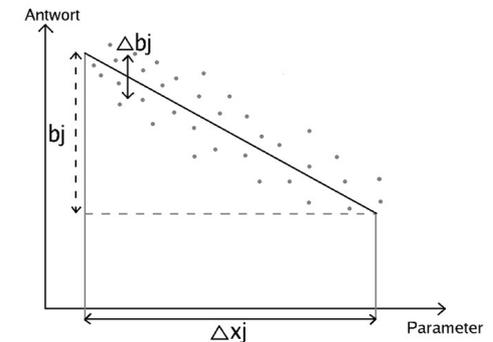
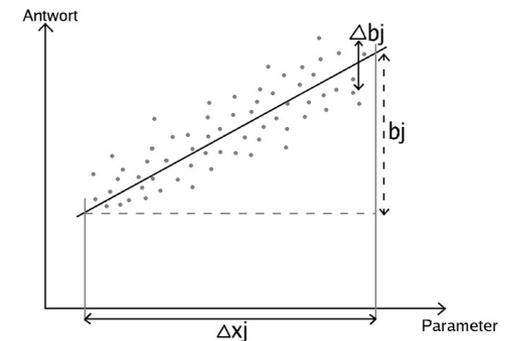
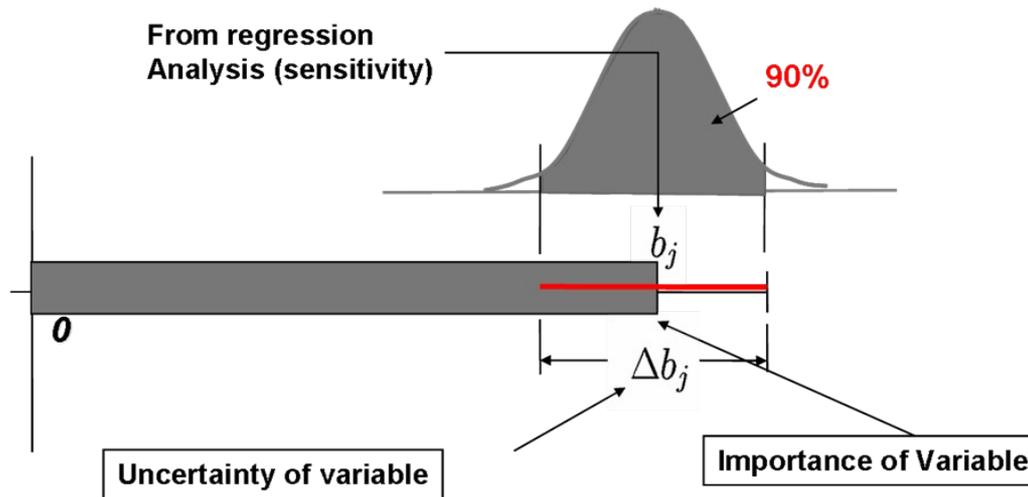
LS-OPT

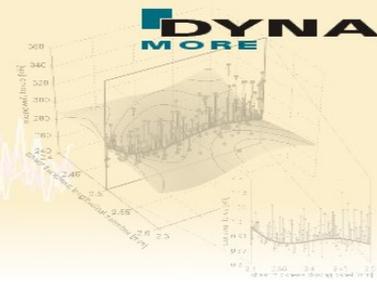
- bietet verschiedene Methoden zur Sensitivitätsanalyse
- erweiterter Funktionsumfang in der aktuellen Version 4.1

Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

ANOVA

- basierend auf Regressionsanalyse am linearen Ersatzmodell
 - Regressionskoeffizient b_j
 - Streuung Δb_j





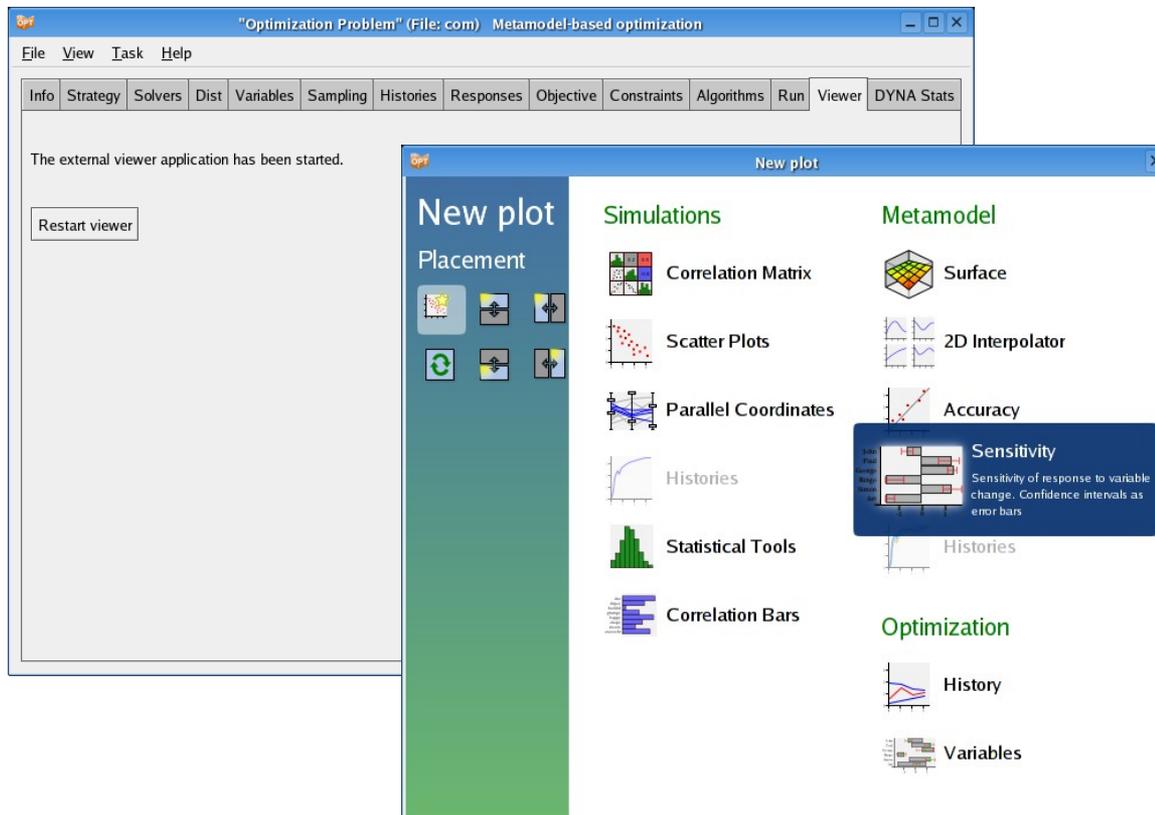
ANOVA

- 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

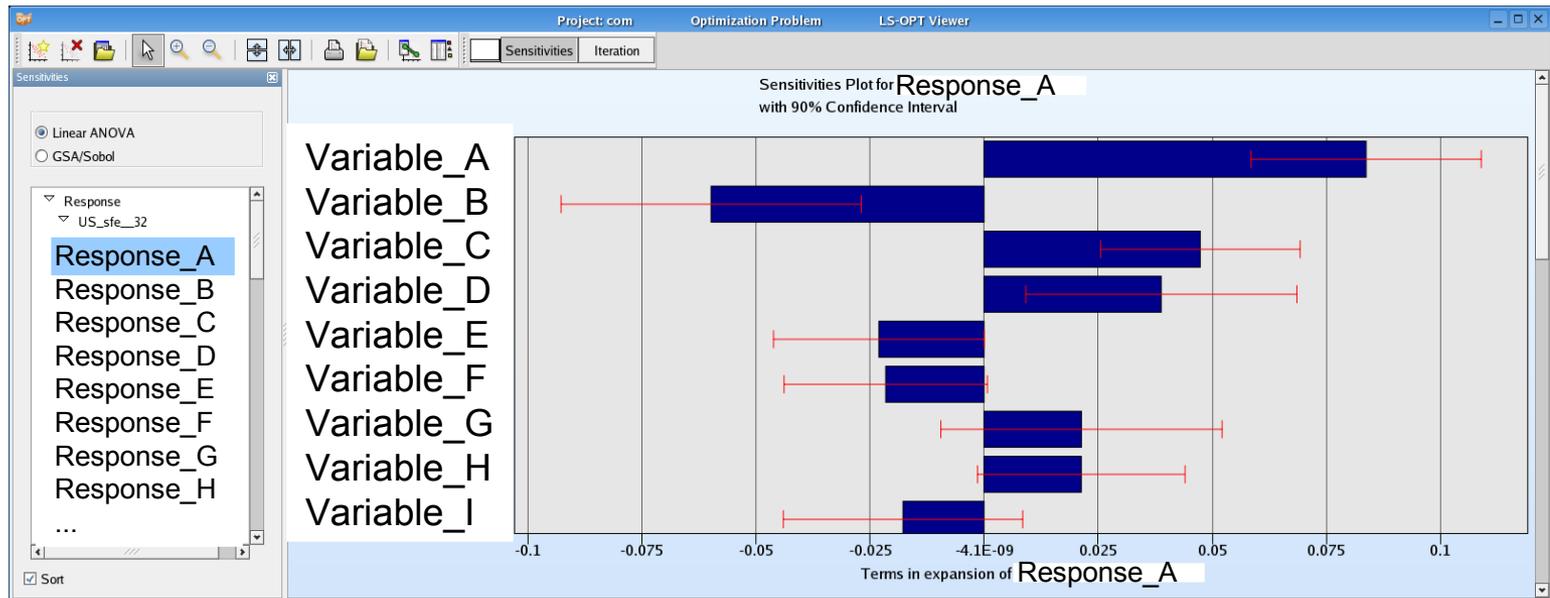
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

ANOVA

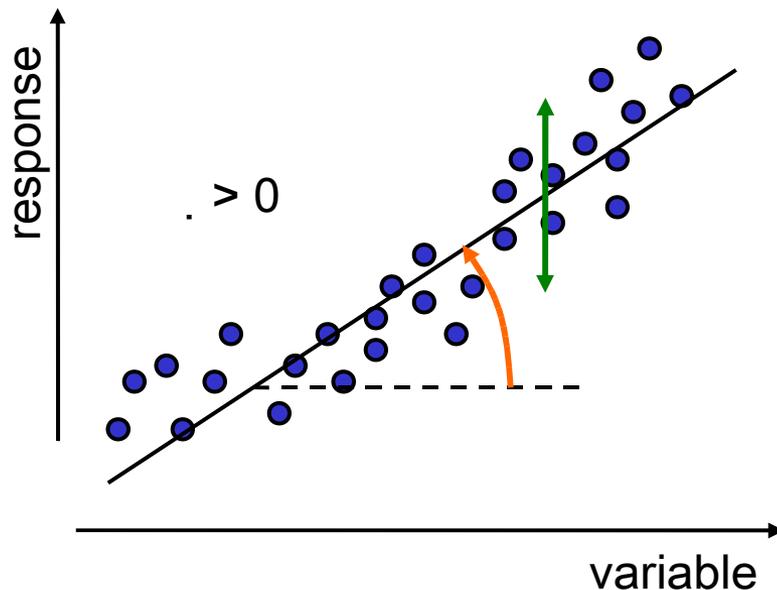
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



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

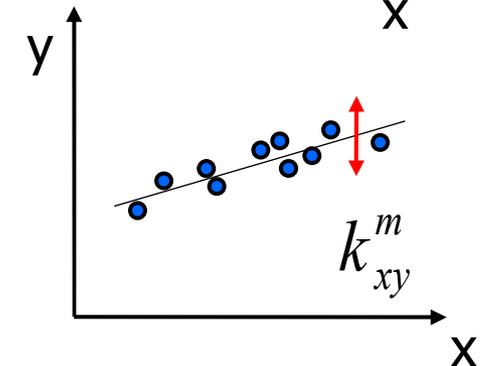
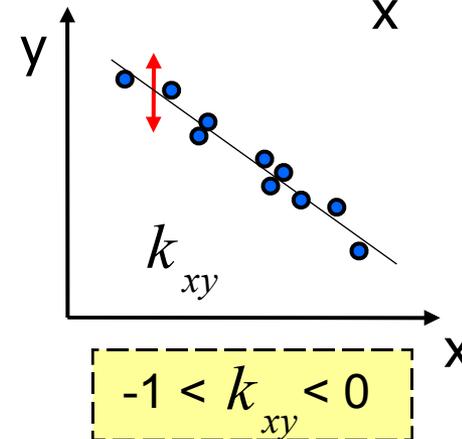
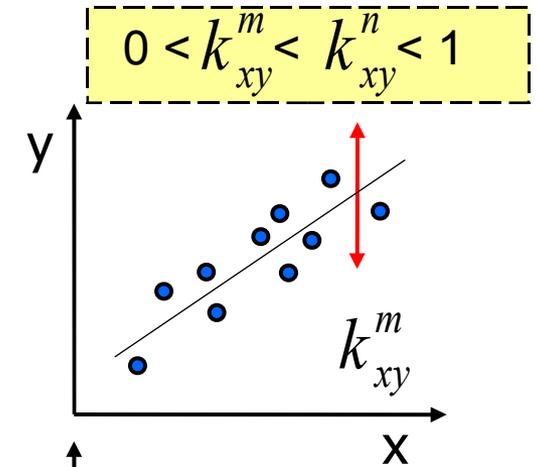
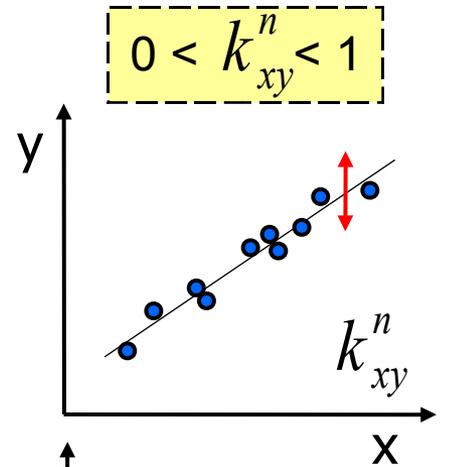
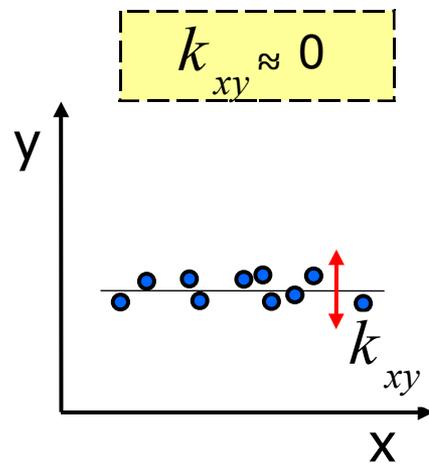


$$k_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

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

Korrelationsanalyse

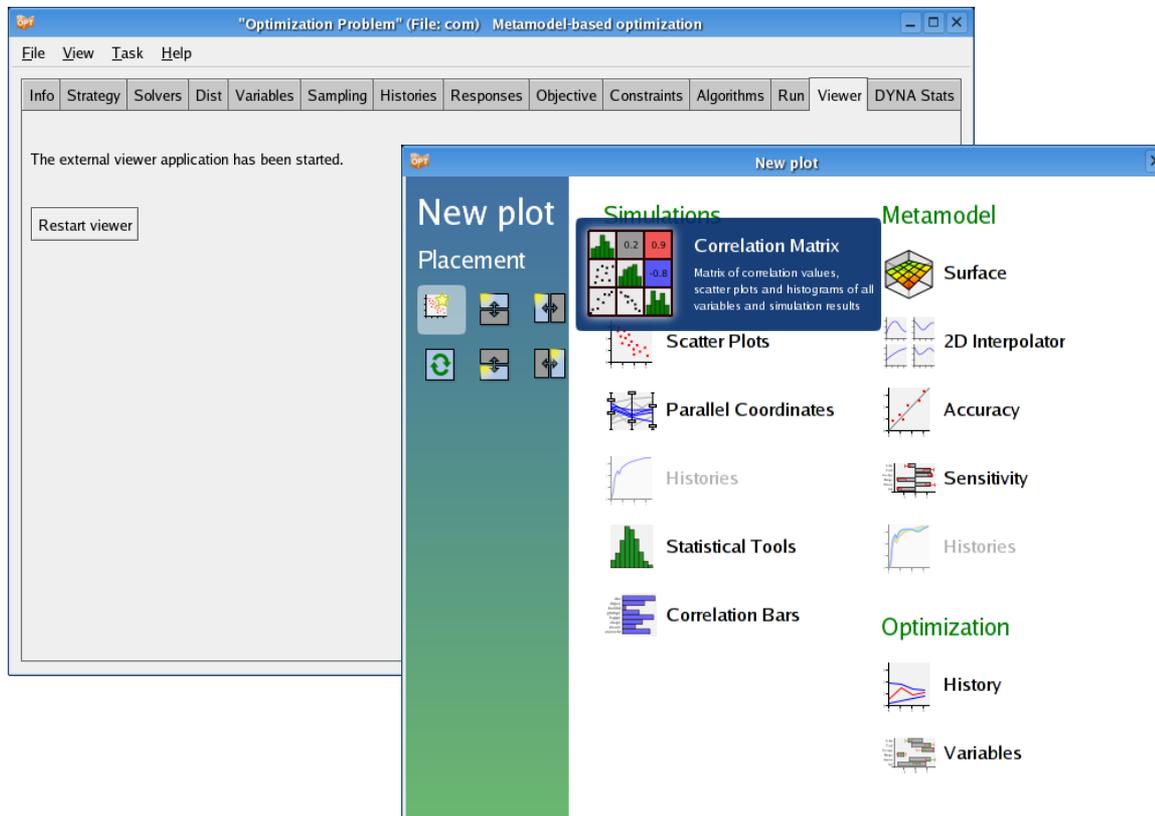
- Korrelationskoeffizient



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Korrelationsanalyse

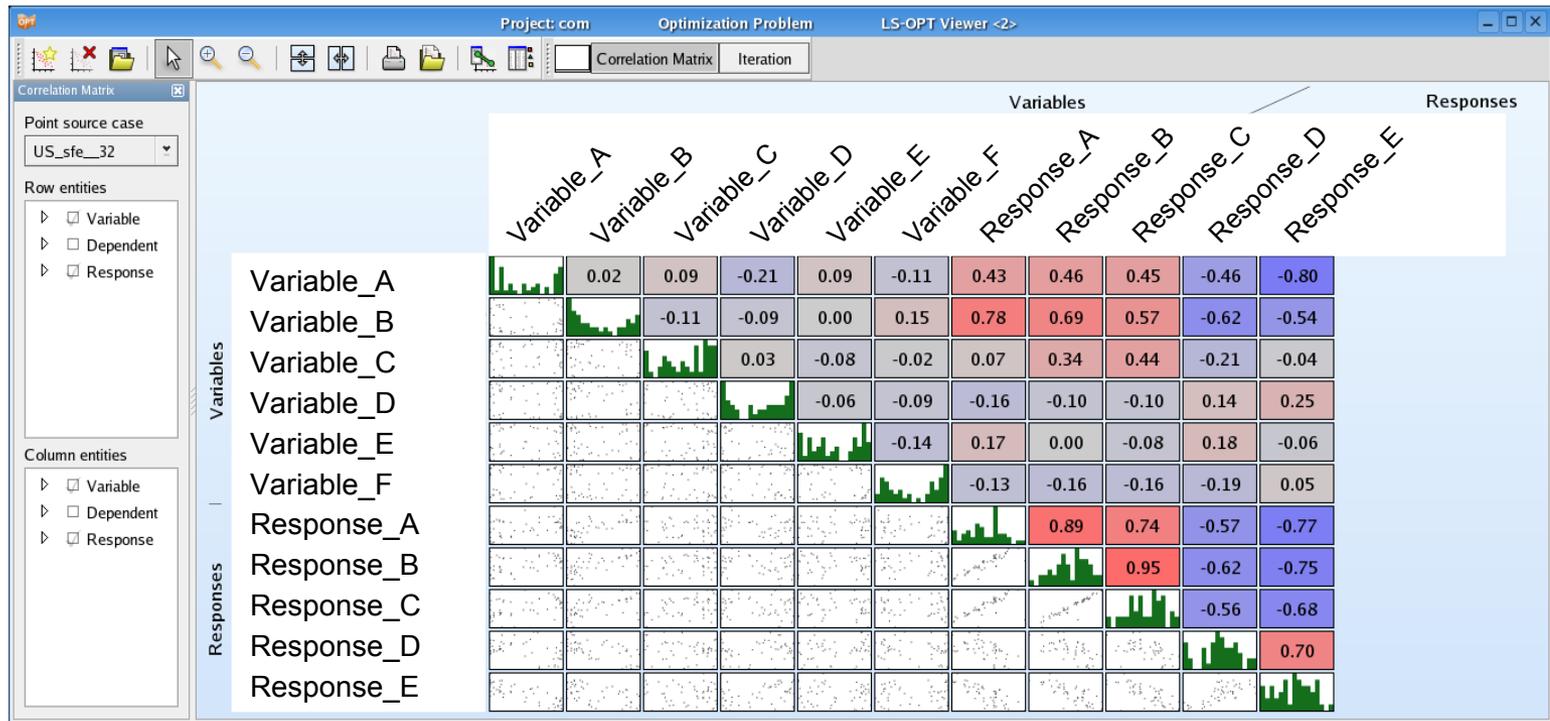
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Korrelationsanalyse

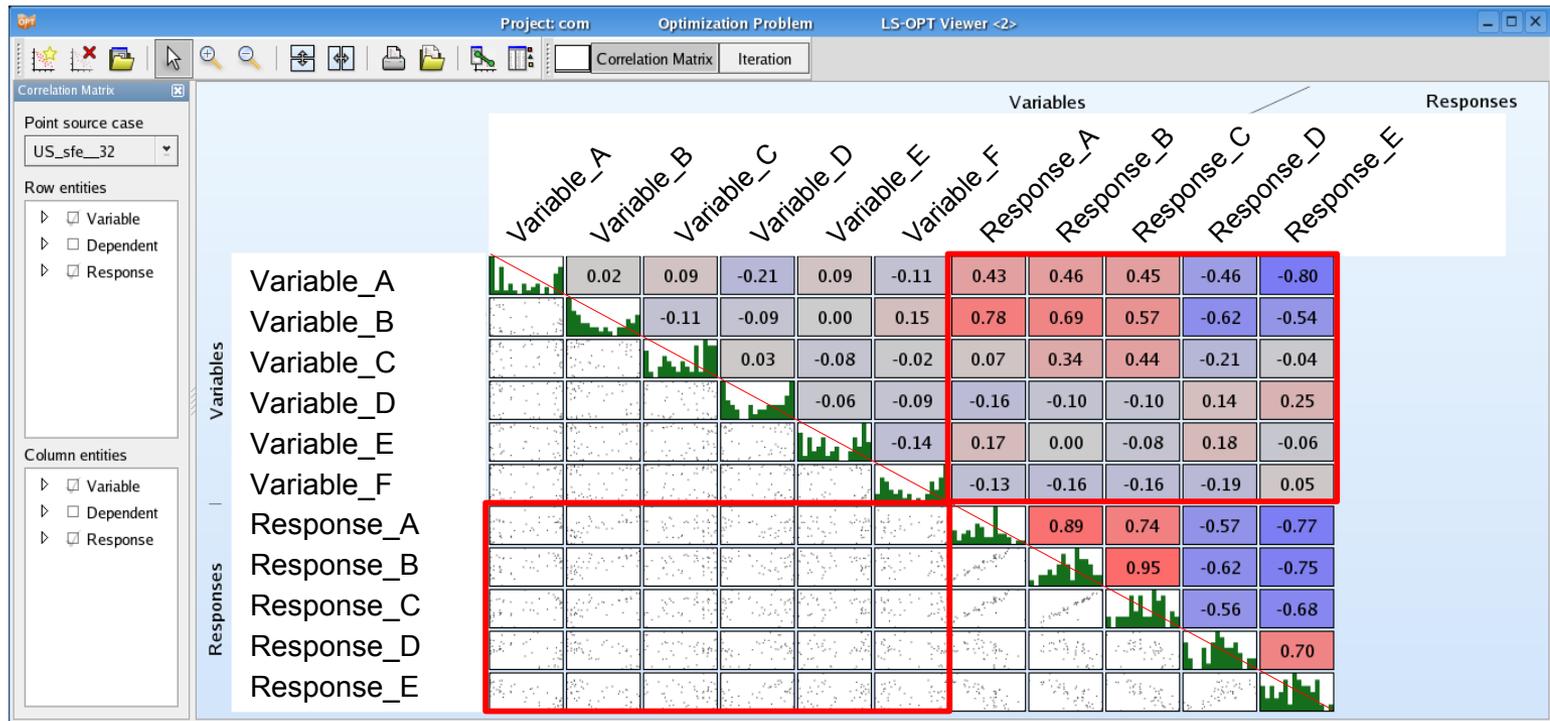
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Korrelationsanalyse

- Visualisierung in LS-OPT 4.1



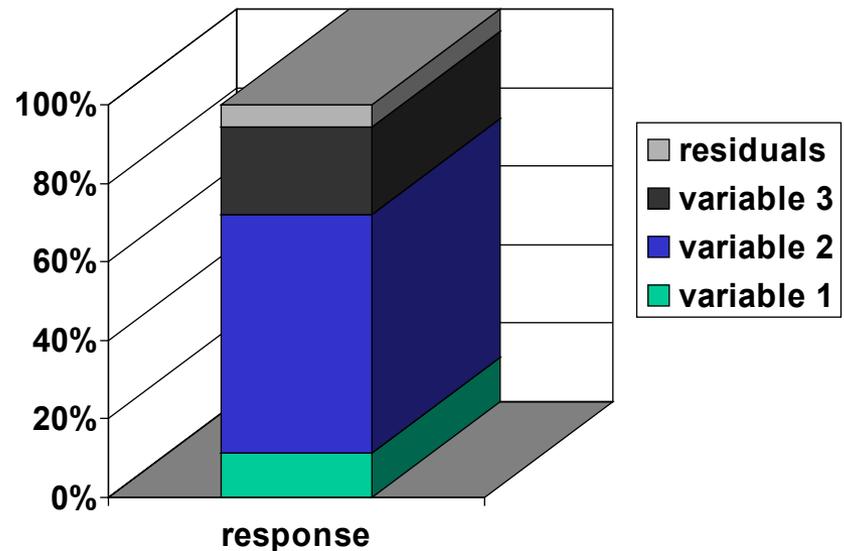
Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

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

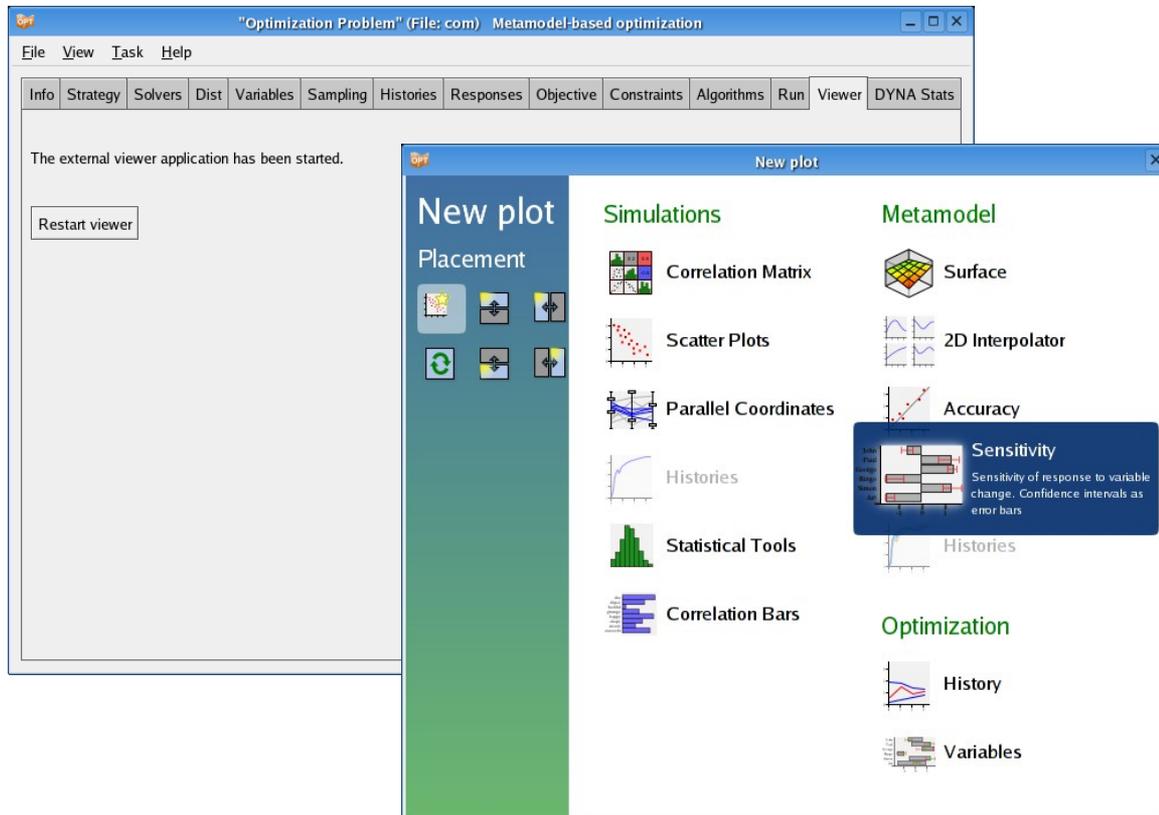
$$S_i = \frac{\text{Varianz in Folge } v_i}{\text{Gesamtvarianz der Antwortgröße}}$$



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Sobol-Indices

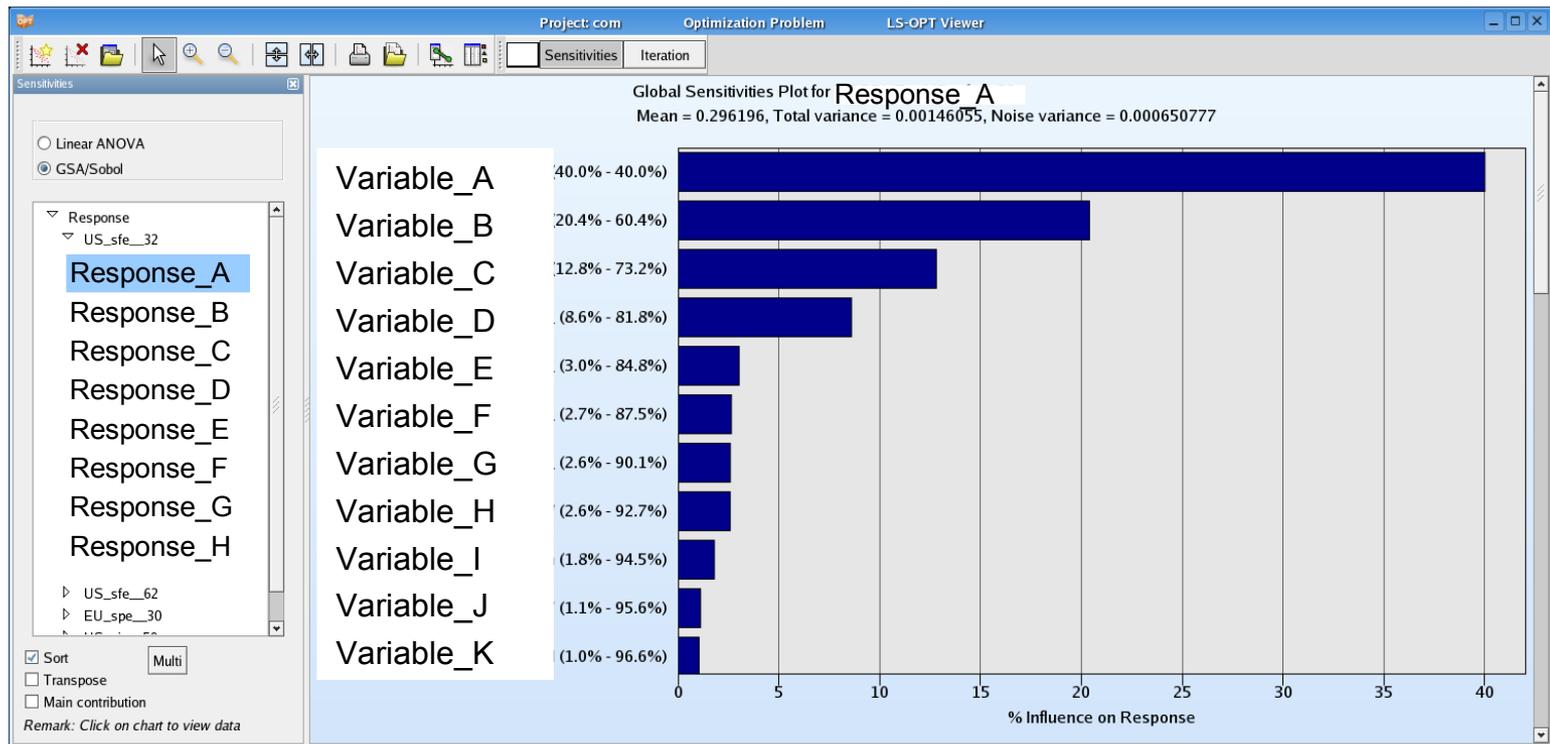
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Sobol-Indices

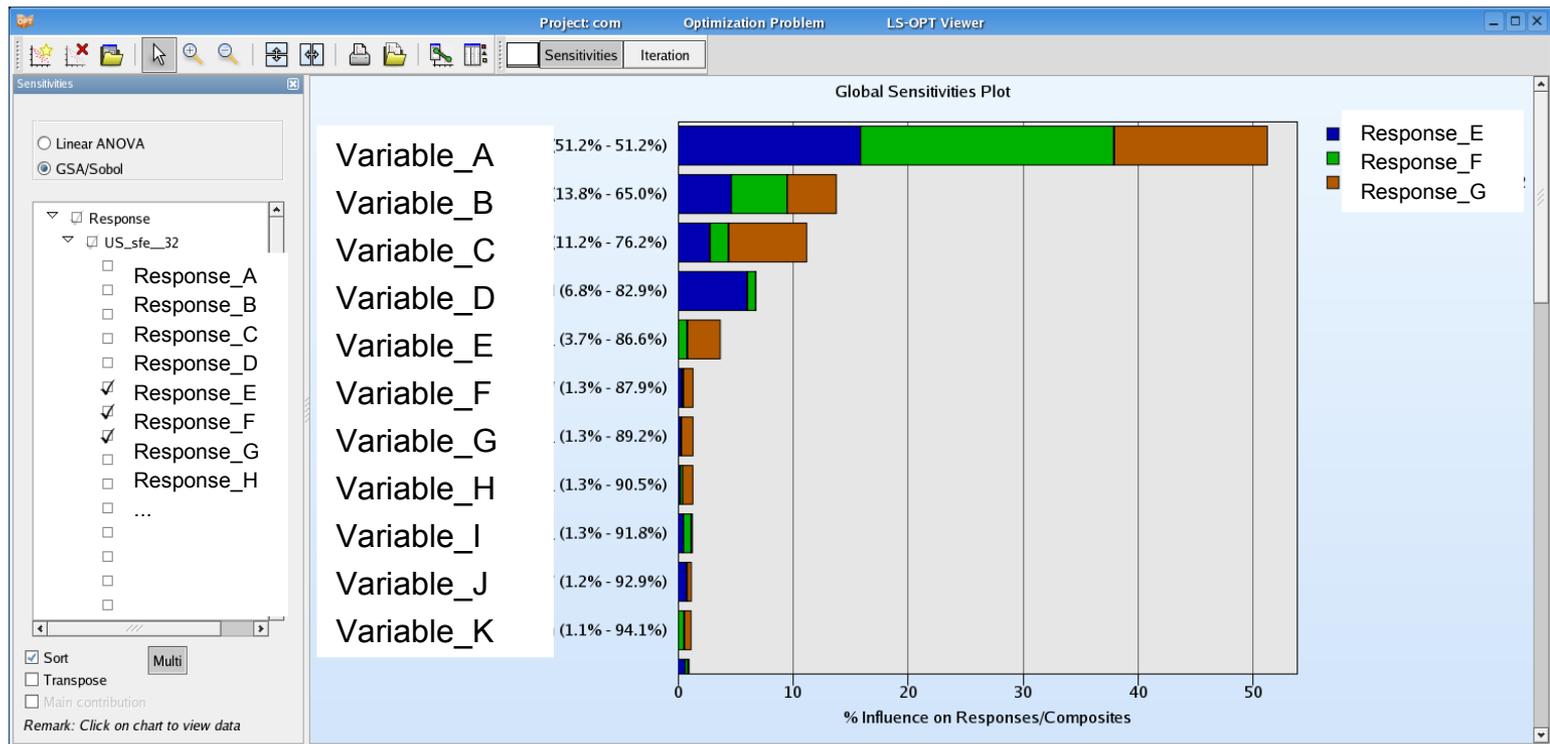
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



Methoden und Visualisierung in LS-OPT 4.1

Sobol-Indices

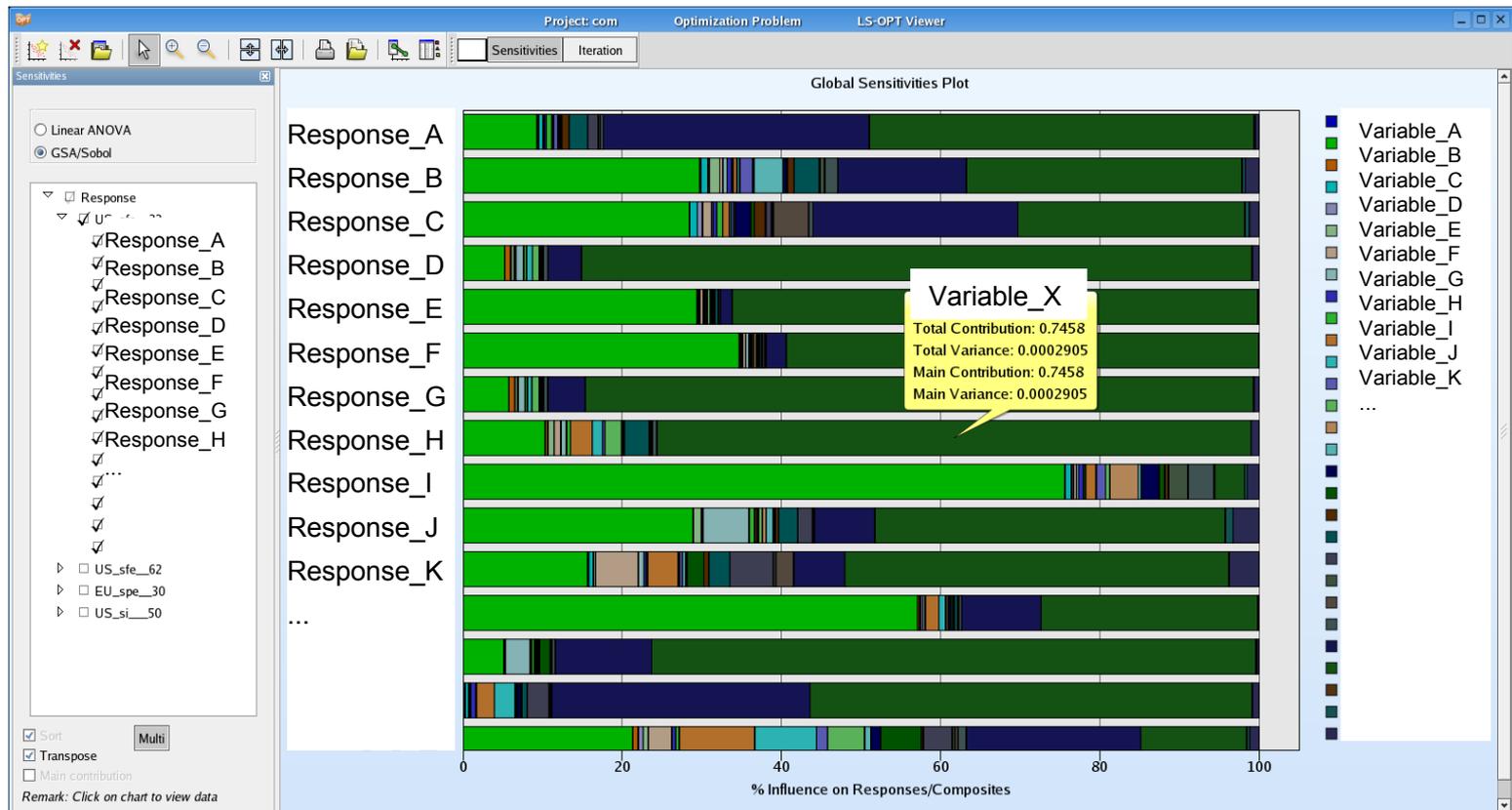
- Visualisierung in LS-OPT 4.1



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

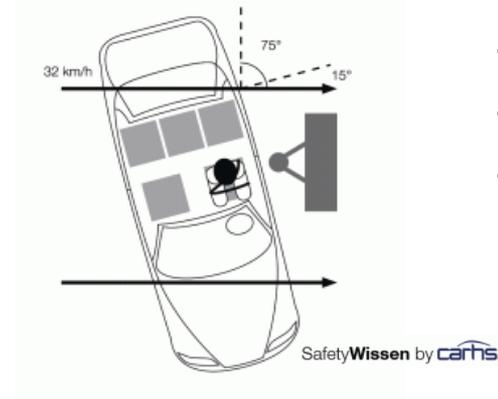
Lastfälle

EuroNCAP Pfahl



- Pfahl 90°
- 30 km/h
- EuroSID2

FMVSS 214 Pfahl ES2



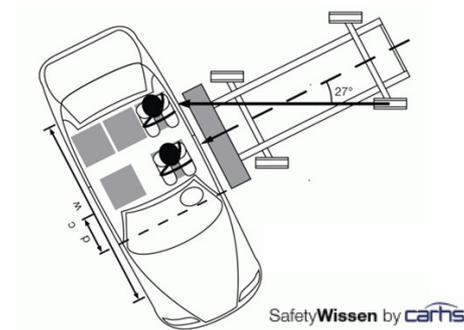
- Pfahl 75°
- 32 km/h
- ES-2re

IIHS



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

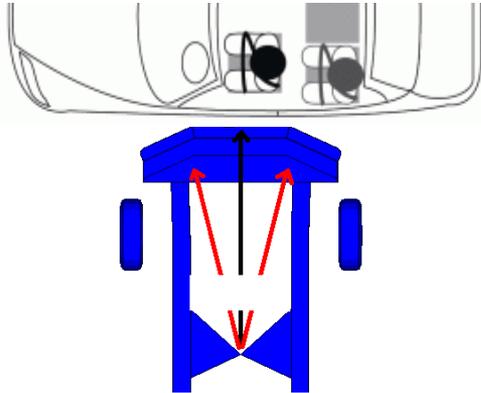
US-SINCAP Barriere



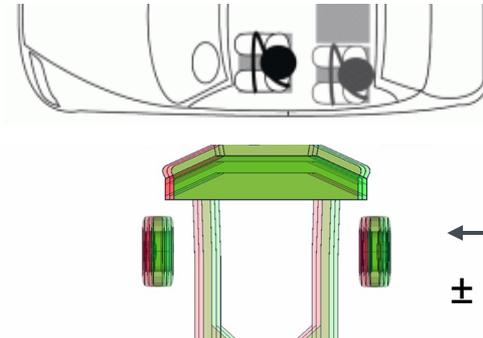
- Barriere 27°
- 62 km/h
- ES-2re
- SID2 BLD

Anwendungsbeispiel

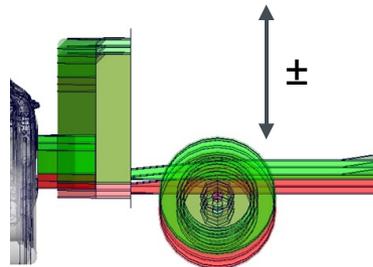
Parameter: Bewegungsrichtung und Position Barriere/Pfahl



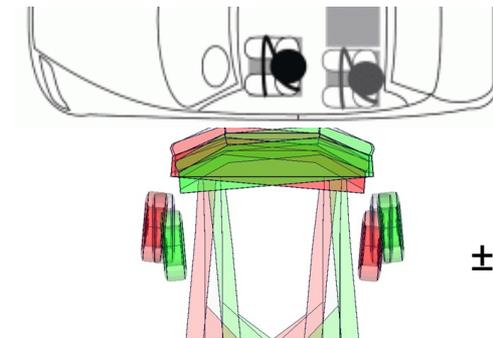
Bewegungsrichtung Barriere/Pfahl



Translation Barriere/Pfahl in x



Translation Barriere in z



Rotation Barriere um z

Anwendungsbeispiel

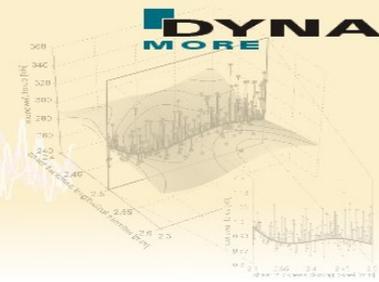
weitere Parameter

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

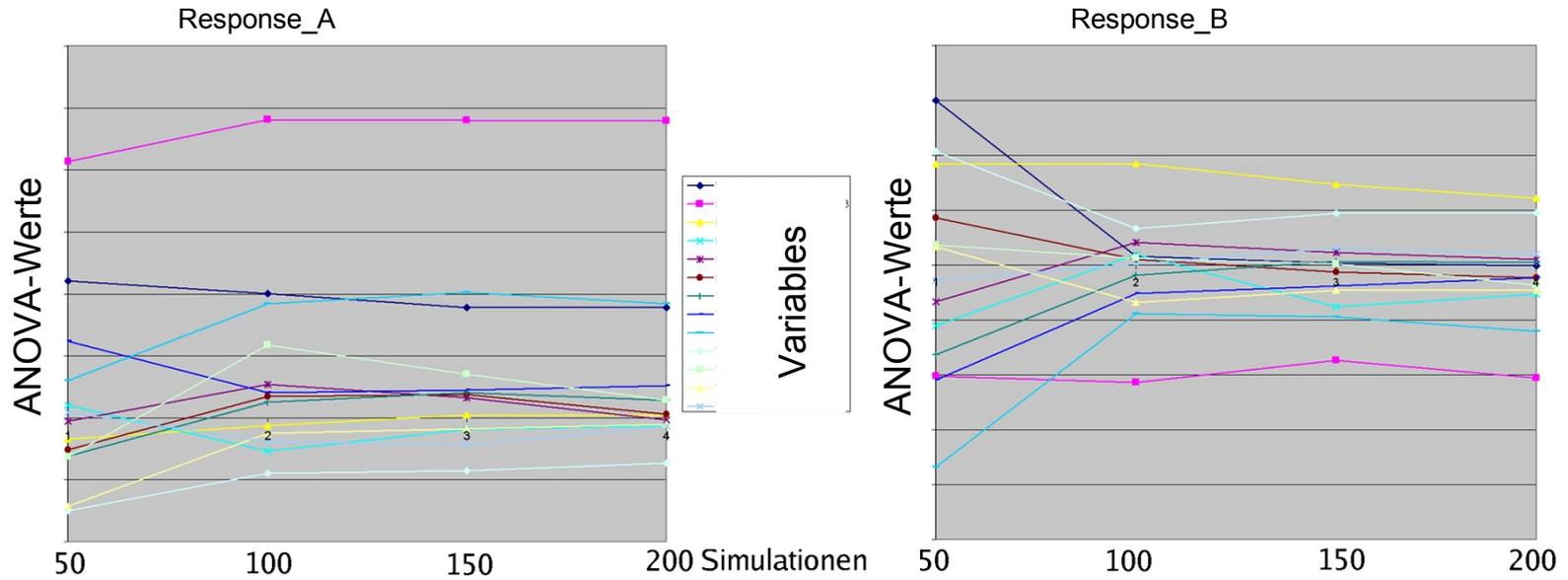
Anwendungsbeispiel

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

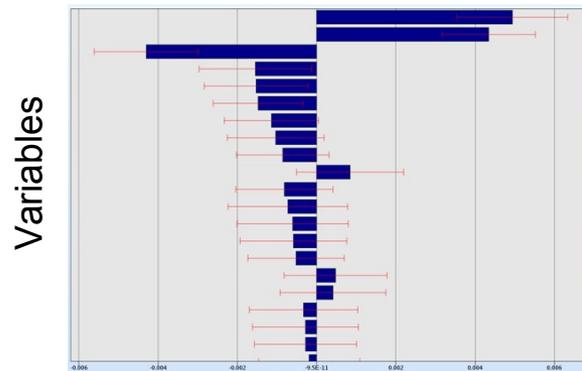


- 4 Iterationen mit je 50 Simulationen
 - große Änderungen zwischen 50 und 100 Simulationen
 - über 100 Simulationen nur noch geringe Änderungen
- aber: Anzahl der Simulationen abhängig von Anzahl der Parameter

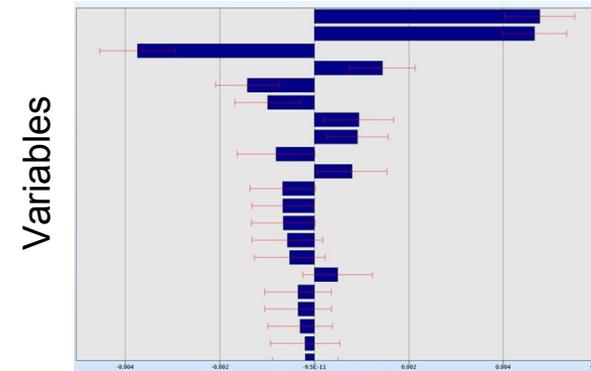
Anwendungsbeispiel

Konvergenzuntersuchung

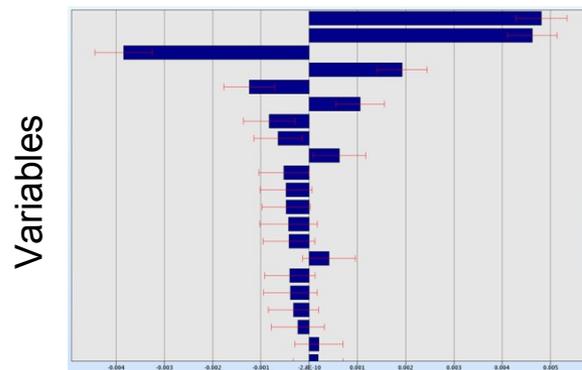
50 Punkte



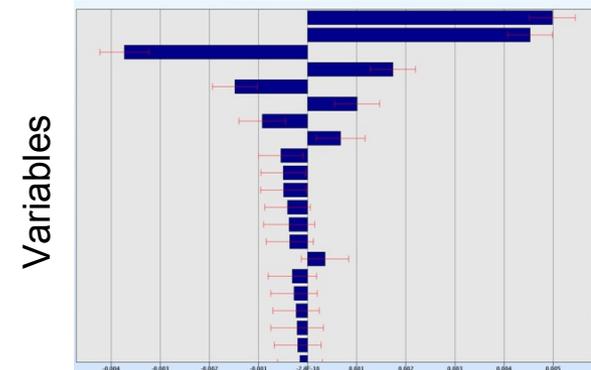
100 Punkte



150 Punkte

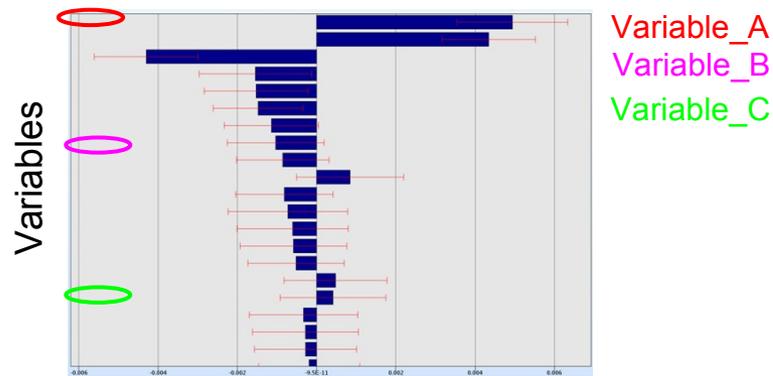


200 Punkte

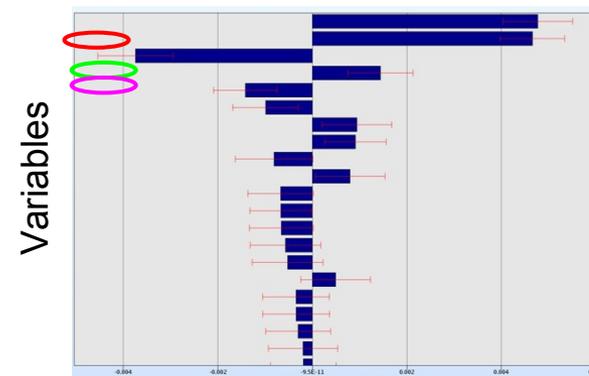


Konvergenzuntersuchung

50 Punkte



100 Punkte



150 Punkte

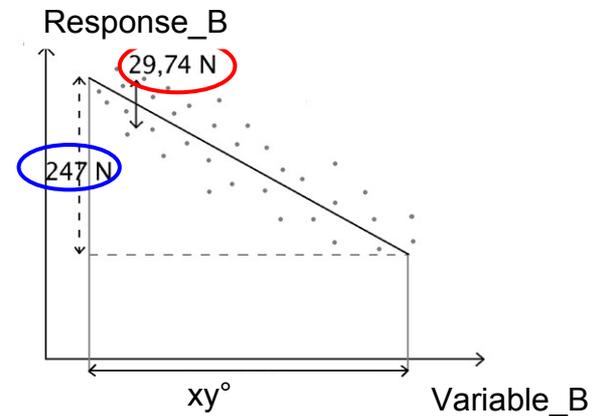
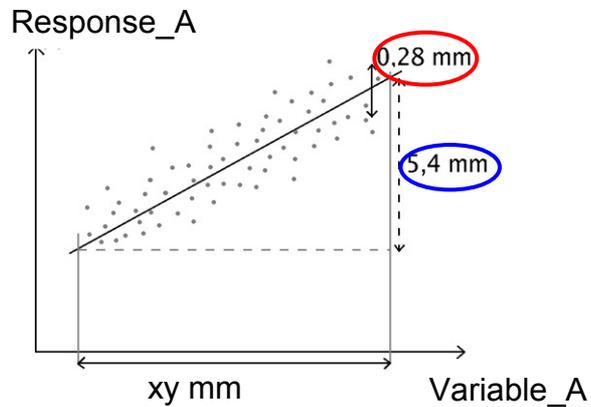
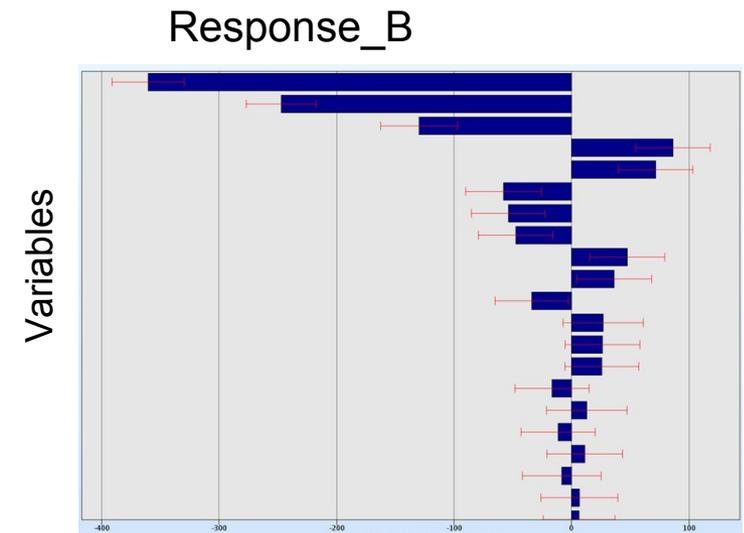
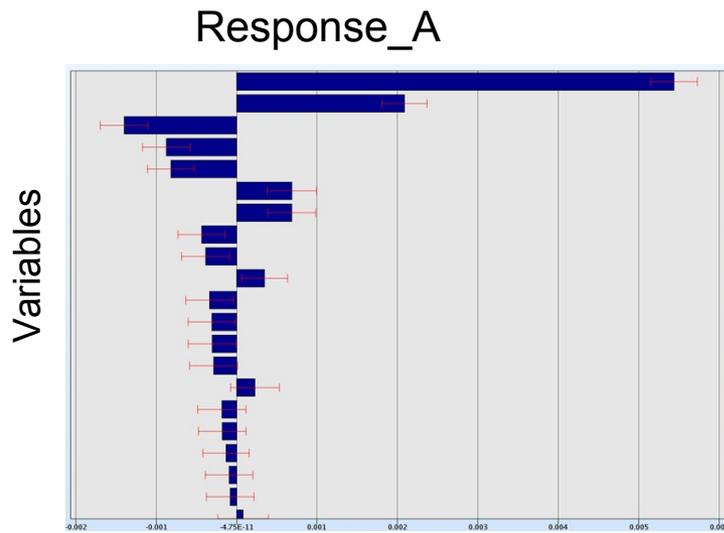


200 Punkte



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: $100 / 1000 = 0,1 = 10 \%$

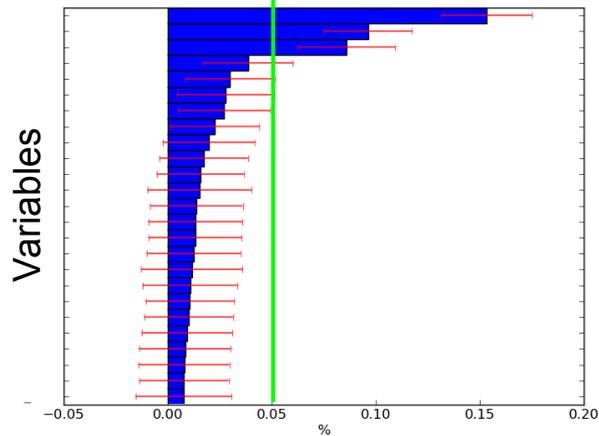
Gesamt: $(0,5 + 0,1) / 2 = 0,3 = 30 \%$

- bezogen auf die jeweiligen Grenzwerte beträgt die mittlere Änderung der Ergebnisgrößen im Lastfall_A 30 % durch Änderung der Variable_A

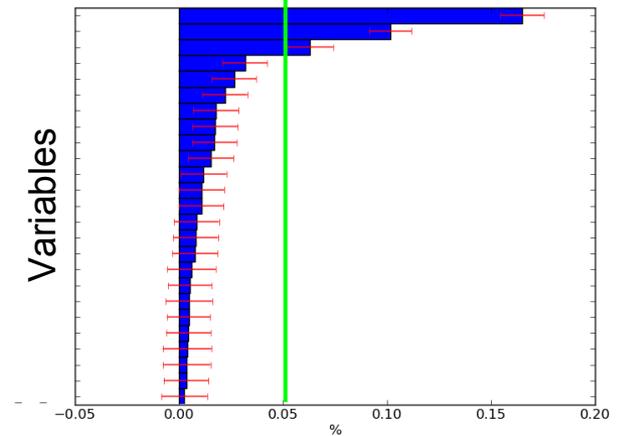
Anwendungsbeispiel

Ranking ANOVA

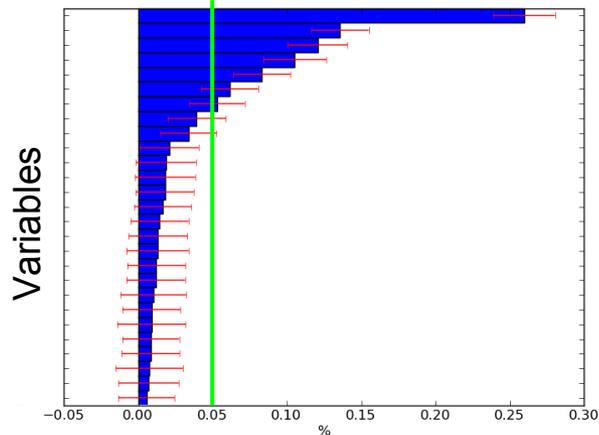
EuroNCAP Pfahl



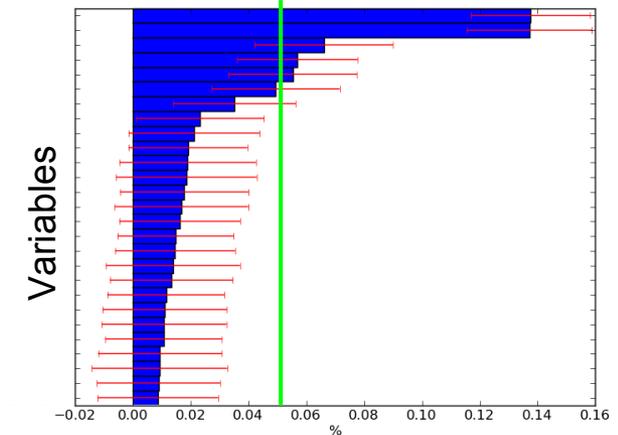
FMVSS 214 Pfahl ES2



IIHS



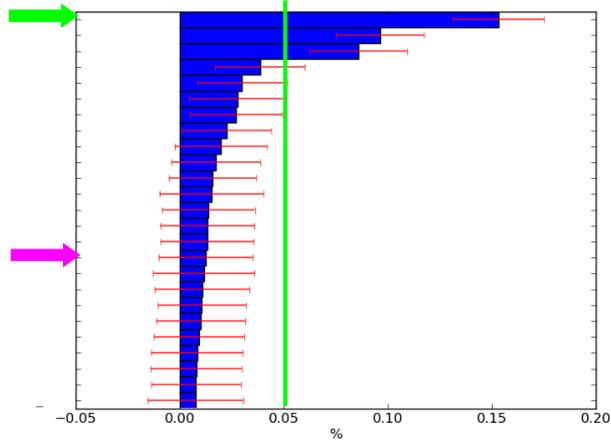
US-SINCAP Barriere



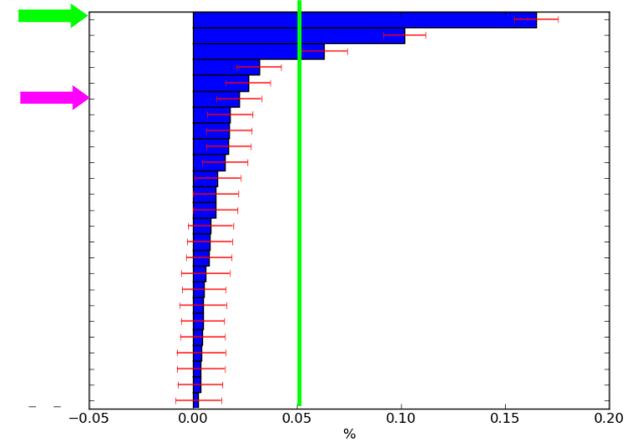
Anwendungsbeispiel

Ranking ANOVA

EuroNCAP Pfahl

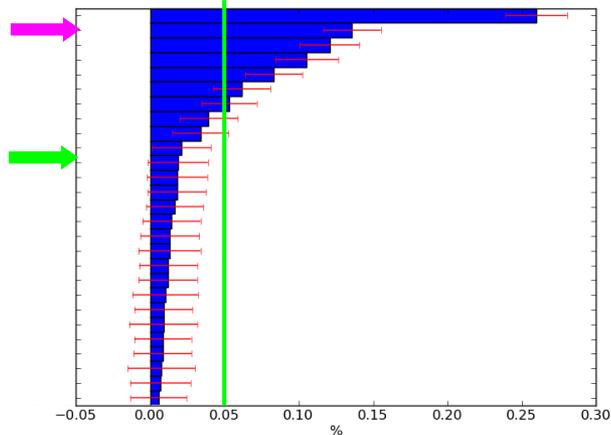


FMVSS 214 Pfahl ES2

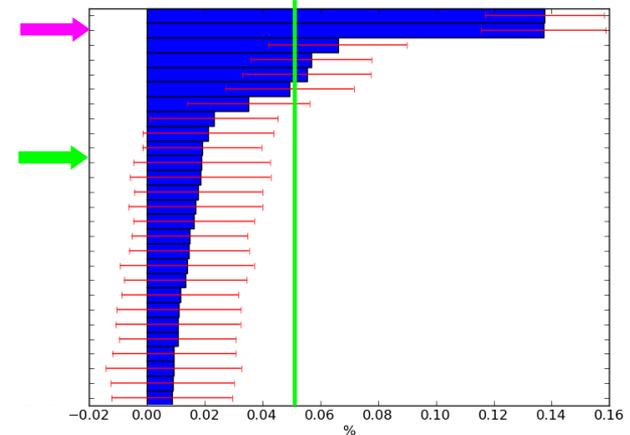


Variable_A
Variable_B

IIHS



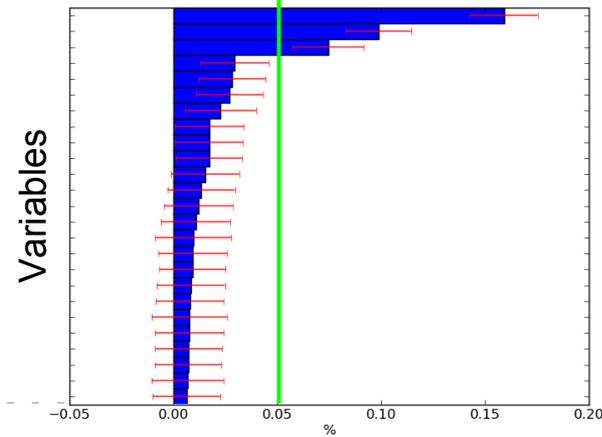
US-SINCAP Barriere



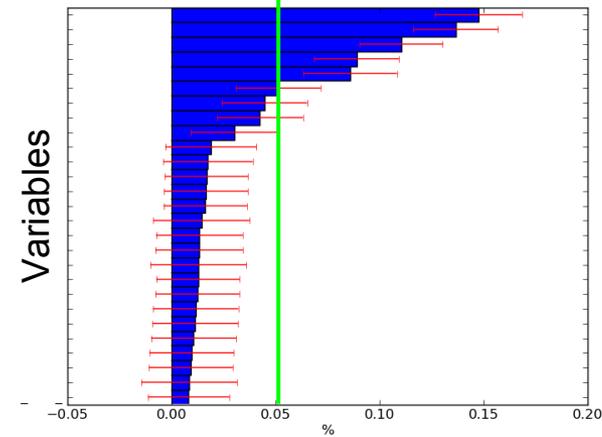
Anwendungsbeispiel

Ranking ANOVA

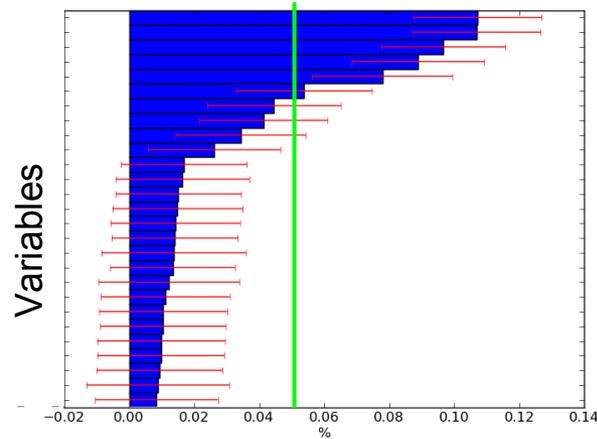
Pfahllastfälle



Barrierenlastfälle



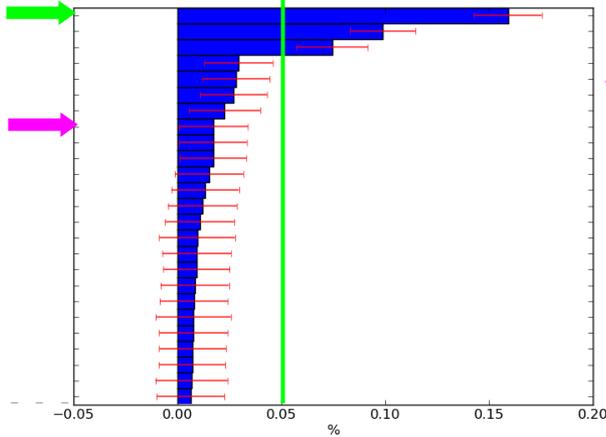
alle Lastfälle



Anwendungsbeispiel

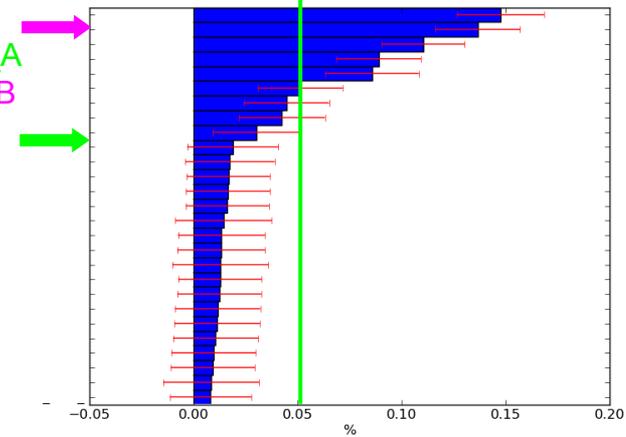
Ranking ANOVA

Pfahllastfälle

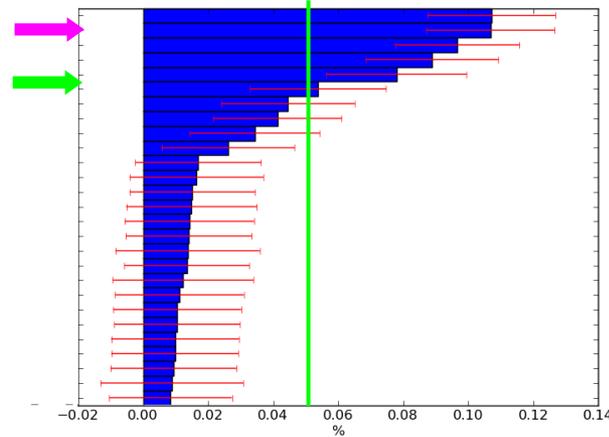


Barrierenlastfälle

Variable_A
Variable_B



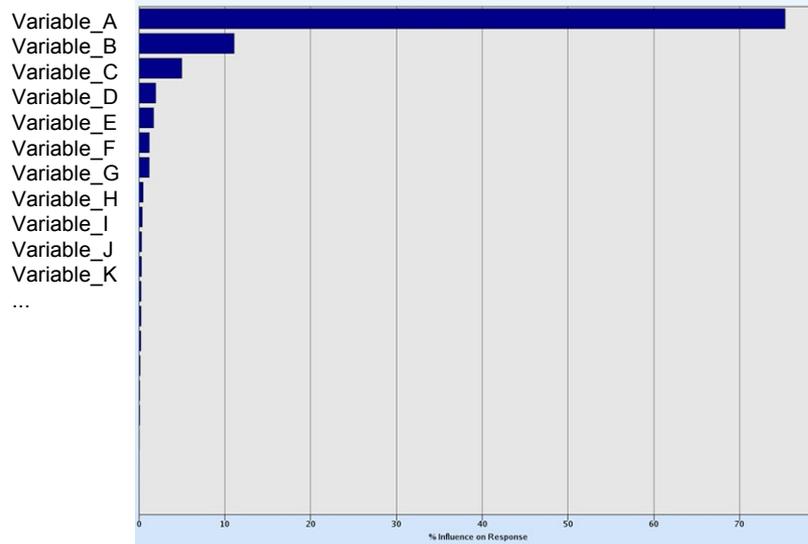
alle Lastfälle



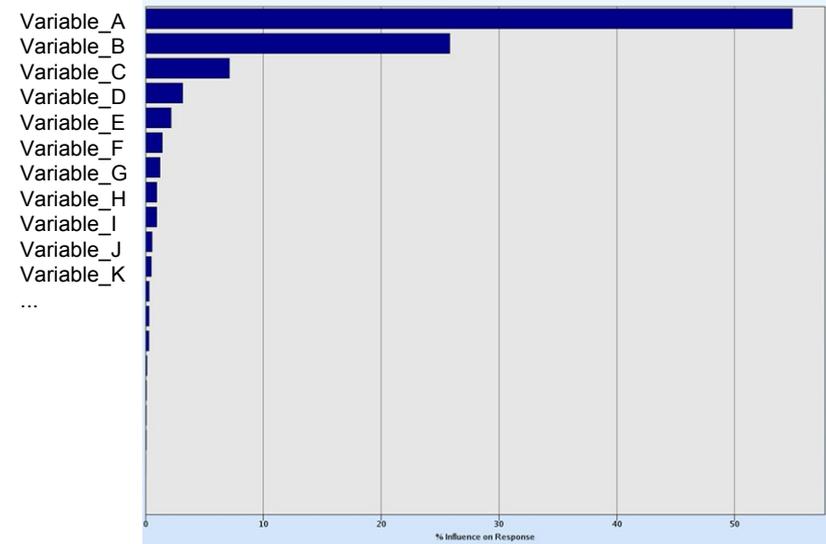
Anwendungsbeispiel

Ergebnisse Sobol

Response_A



Response_B

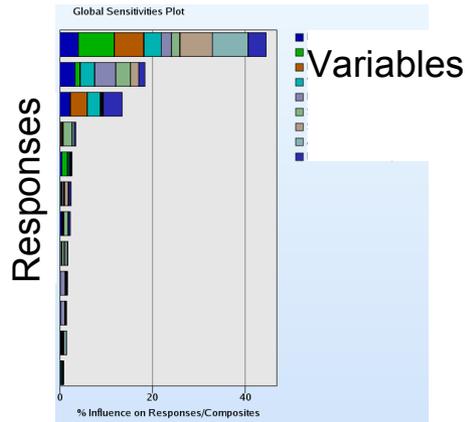


- Werte sind normiert und damit direkt vergleichbar
- Werte lassen sich im LS-OPT Viewer zusammenfassen

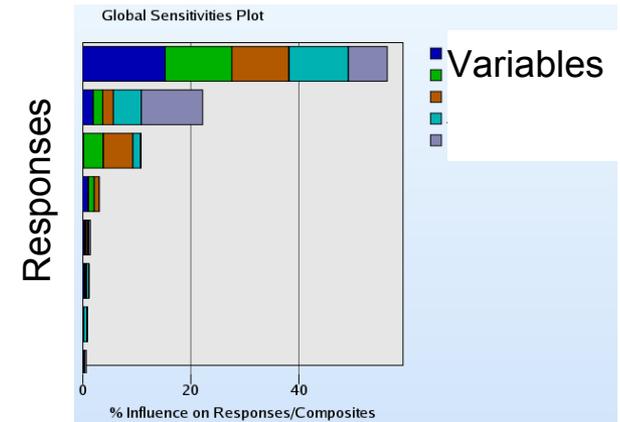
Anwendungsbeispiel

Ranking Sobol

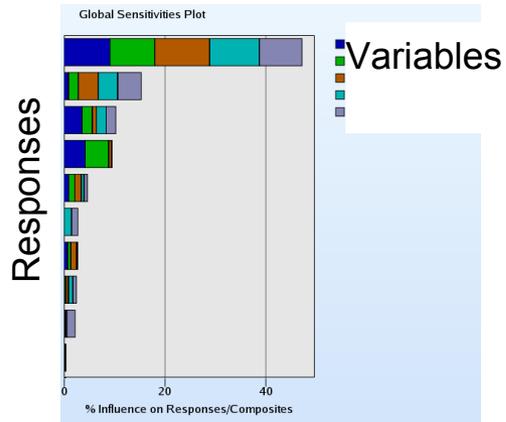
EuroNCAP Pfahl



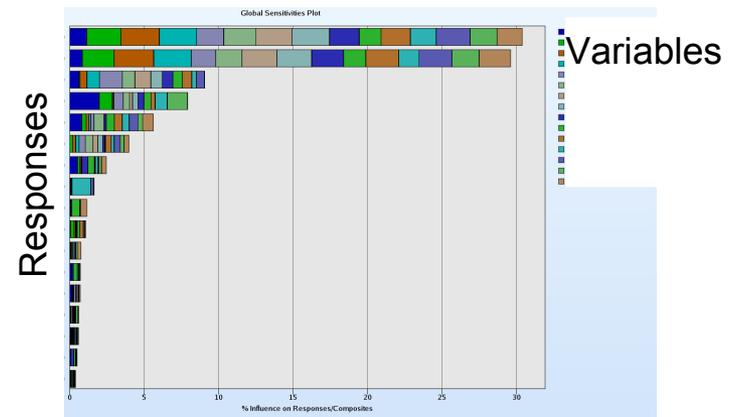
FMVSS 214 Pfahl ES2



IIHS



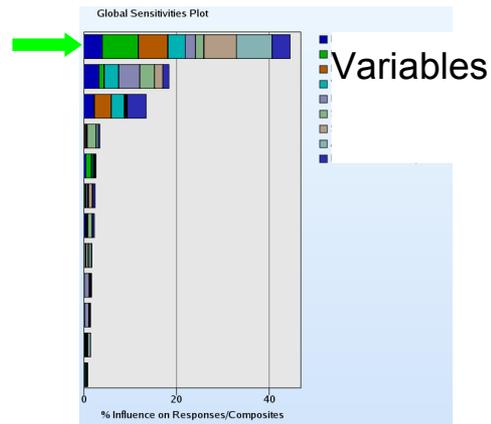
US-SINCAP Barriere



Anwendungsbeispiel

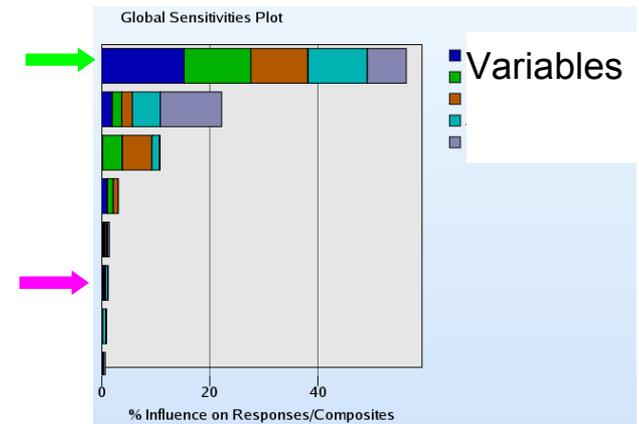
Ranking Sobol

EuroNCAP Pfahl

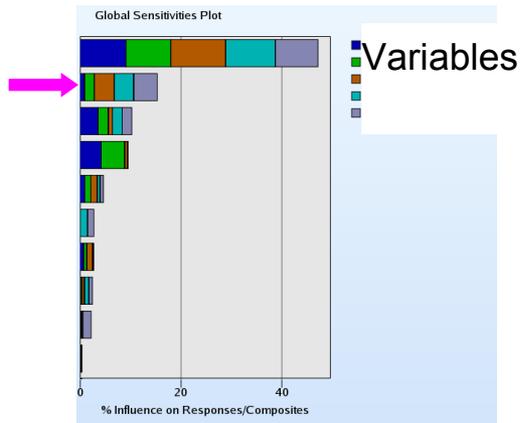


FMVSS 214 Pfahl ES2

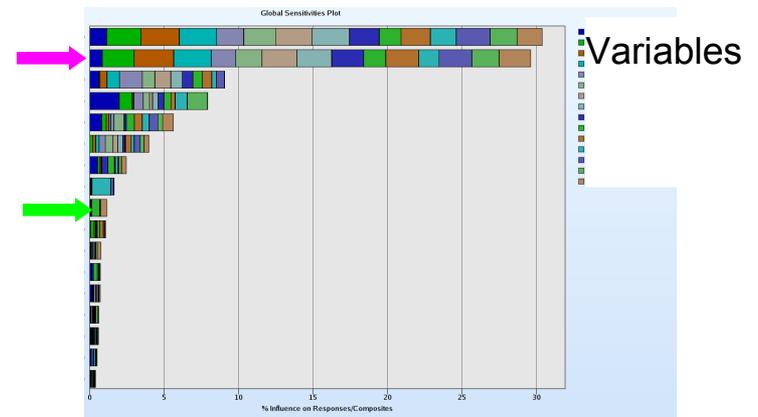
Variable_A
Variable_B



IIHS



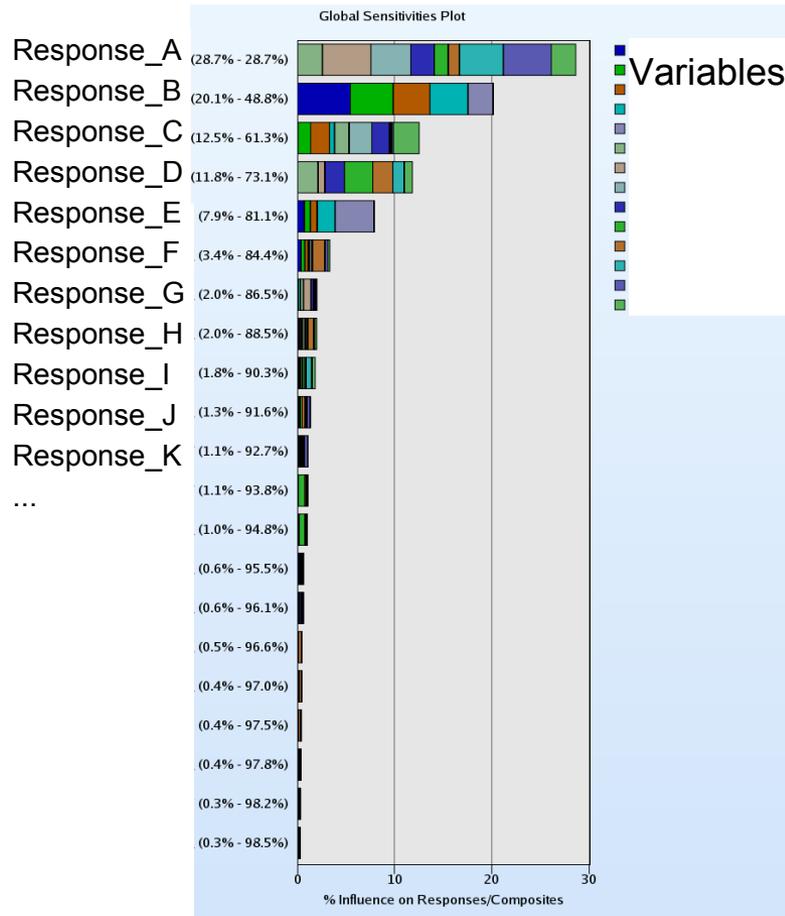
US-SINCAP Barriere



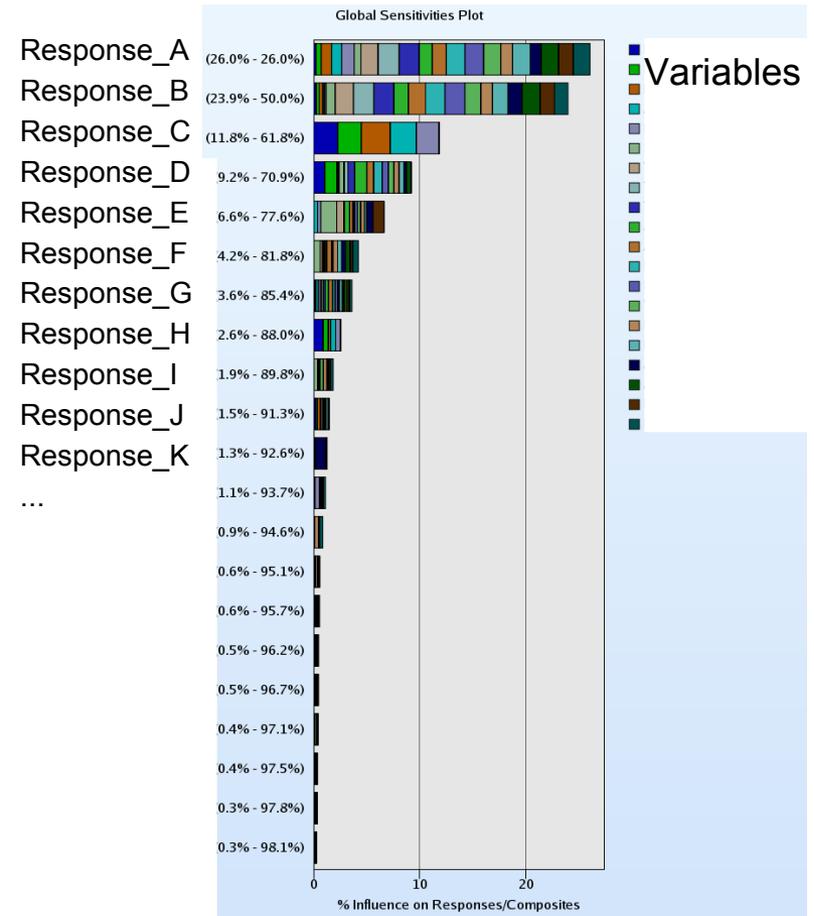
Anwendungsbeispiel

Ranking Sobol

Pfähle



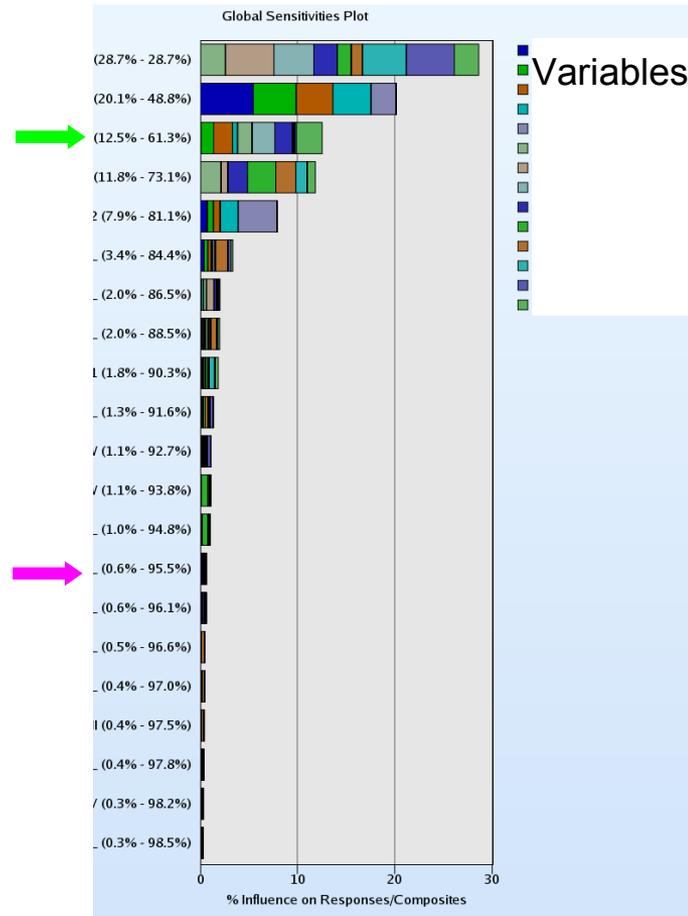
Barrieren



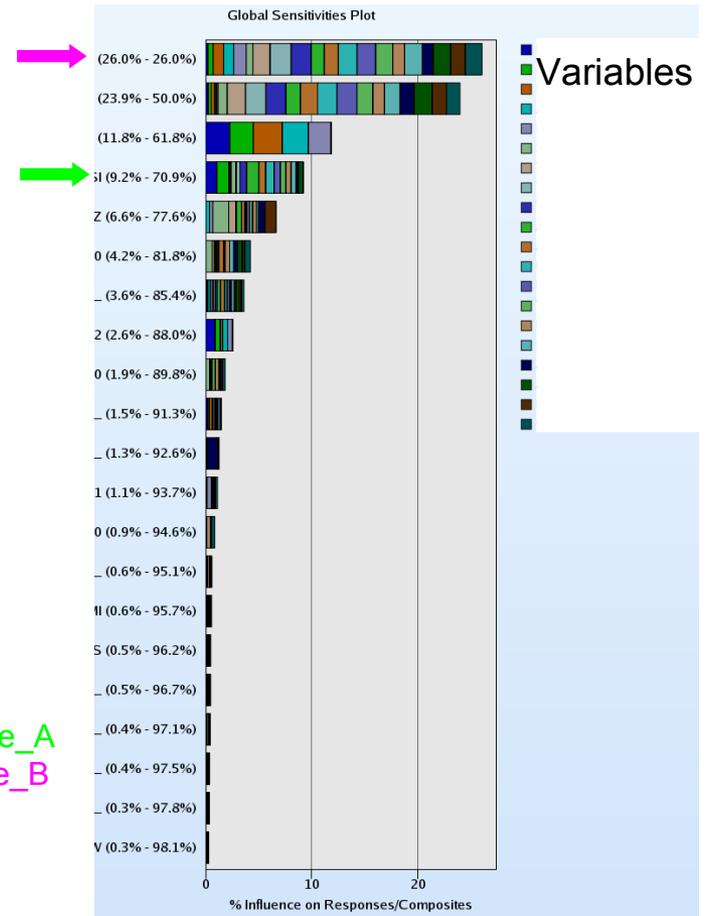
Anwendungsbeispiel

Ranking Sobol

Pfähle

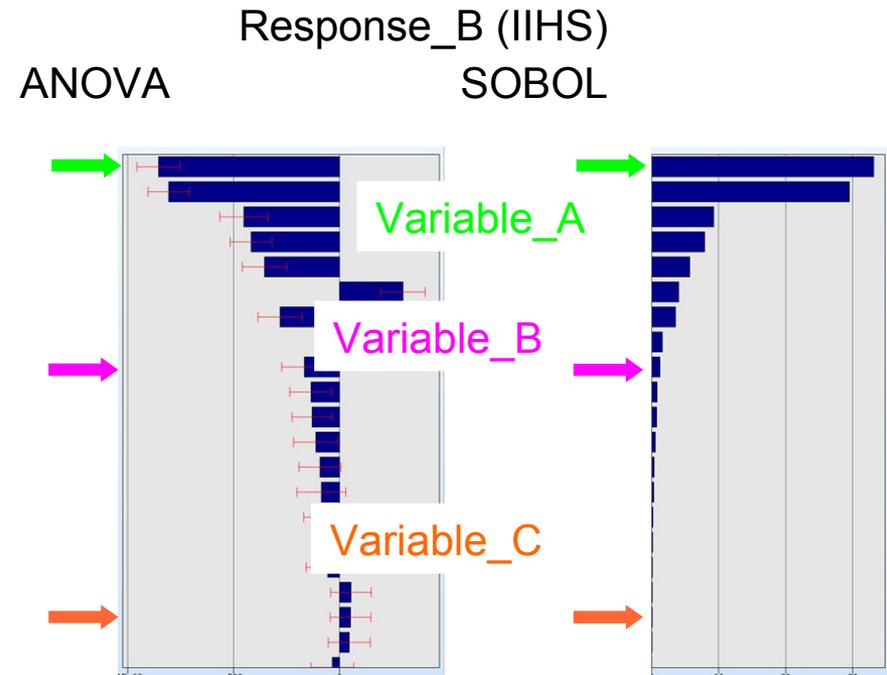
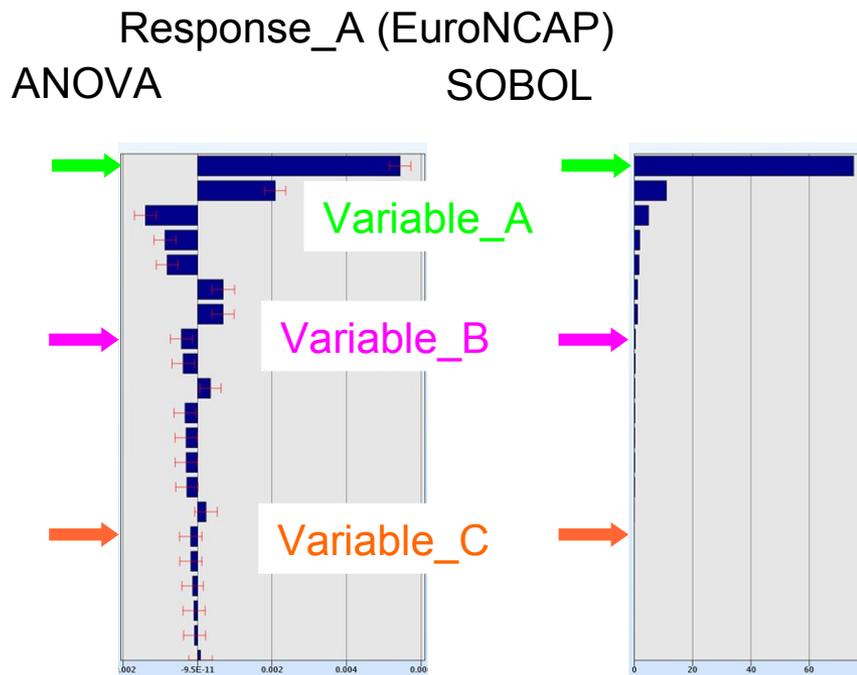


Barrieren



Variable_A
Variable_B

Gegenüberstellung ANOVA – Sobol



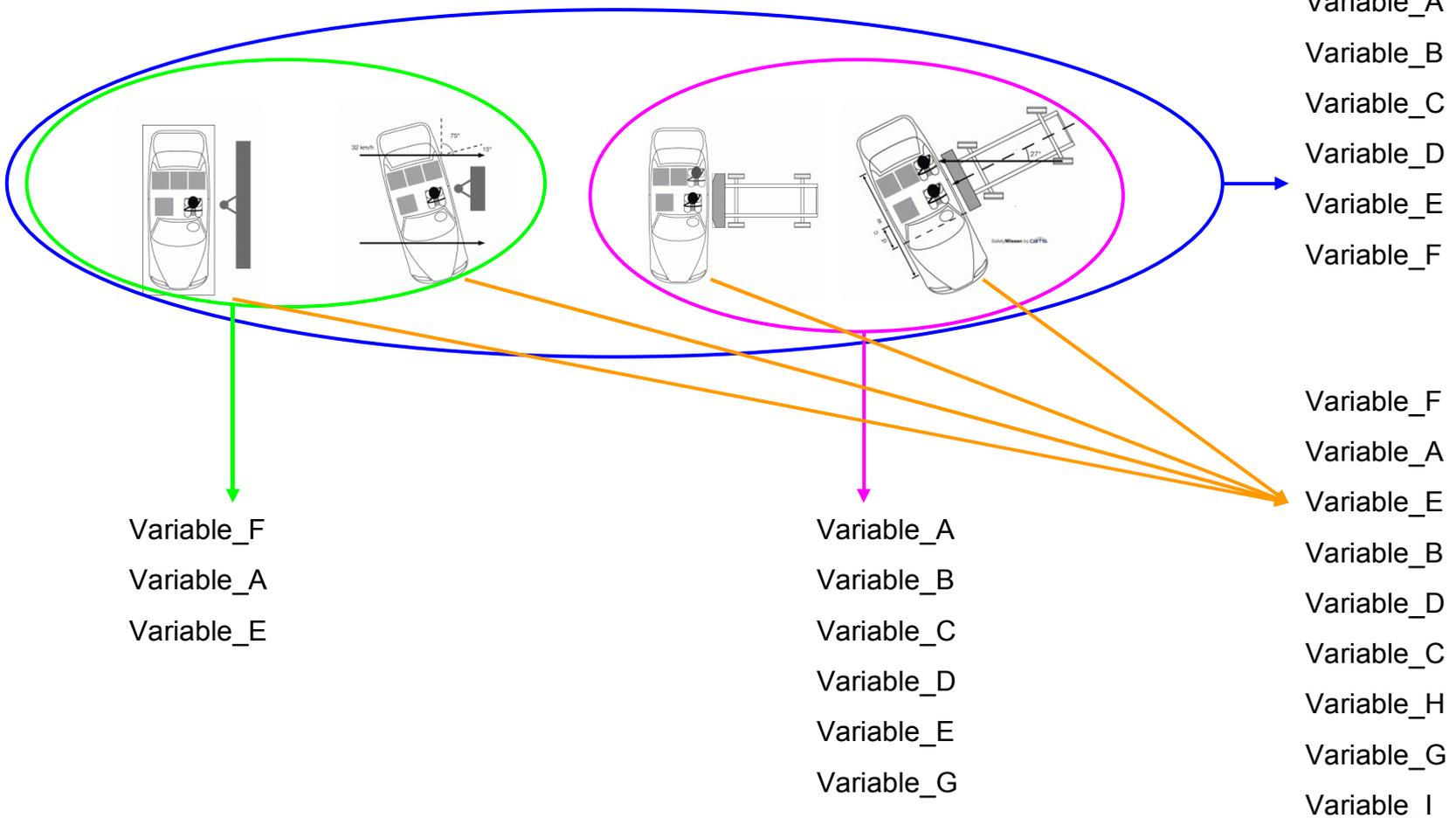
- Reihenfolge der Parameter beim Ranking identisch

hier z.B: EuroNCAP: Response_A

bzw. IIHS: Response_B

Anwendungsbeispiel

Auswahl relevanter Parameter



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!

