

Messung der Higgs–Gluon–Tensorkopplung in Zerfällen $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ mit dem ATLAS–Detektor

DPG–Frühjahrstagung 2018 in Würzburg

Maxim Sinner

21. März 2018

Betreuerin: Sandra Kortner

Max–Planck–Institut für Physik
(Werner–Heisenberg–Institut)



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

- Eigenschaften, wie **Spin** oder **Parität** im LHC-RUN1 gemessen.
- Bisher: Vorhersagen des Standardmodells (SM) bestätigt:

$$J^{\mathcal{CP}} = 0^+ \text{ Hypothese bevorzugt } (\mathcal{CP}\text{-gerade})$$

- Viele Modelle jenseits des Standardmodells (BSM) nehmen einen erweiterten Higgs-Sektor an.
 - Higgs-Boson kein reiner Zustand, sondern Überlagerung von \mathcal{CP} -geraden und -ungeraden Anteilen:

$$|\mathbf{H}_{\text{BSM}}\rangle = \cos \alpha |0^+\rangle + \sin \alpha |0^-\rangle$$

- Wegen $\mathcal{CP} |0^\pm\rangle = \pm |0^\pm\rangle$, Verletzung der \mathcal{CP} -Invarianz:

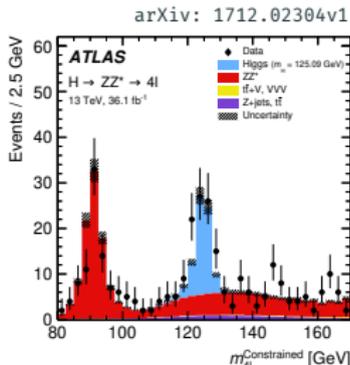
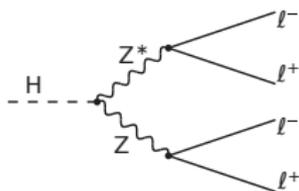
$$\mathcal{CP} |\mathbf{H}_{\text{BSM}}\rangle \neq |\mathbf{H}_{\text{BSM}}\rangle$$

Der Kanal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

Zerfallskanal:

- Zwei Leptonenpaare: jeweils *gleiches Flavour*, *unterschiedliche Ladung*; ($\ell^\pm = e^\pm, \mu^\pm$)
- Klare Signatur, niedrige Ereigniszahl im Endzustand
- Hohes Signal-zu-Background Verhältnis

Signal:

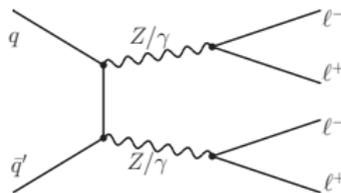


4ℓ -Schnitte:

- $p_T^1 > 20$ GeV, $p_T^2 > 15$ GeV, $p_T^3 > 10$ GeV
- $50 \leq m_{12} \leq 106$ GeV, $12 \leq m_{34} \leq 115$ GeV
- $\Delta R > 0.1$ (0.2) für gleiche (versch.) Flavour
- $118 < m_{4\ell} < 129$ GeV, J/ ψ -Veto

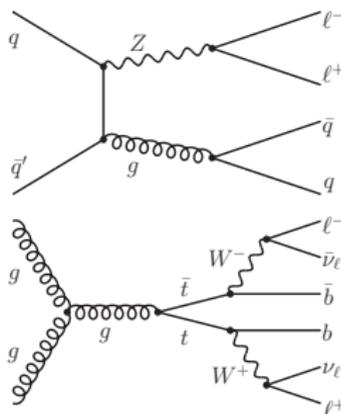
Dominanter Untergrund:

$$qq \rightarrow Z(Z^{(*)})/\gamma$$



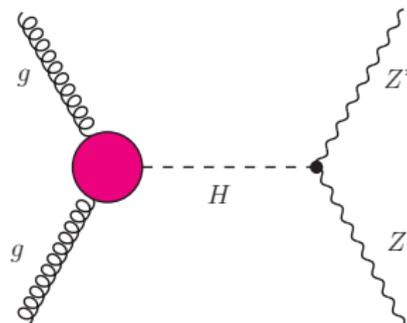
Weiterer Untergrund:

Z + jets und $t\bar{t}$ -Produktion



Higgs–Gluon–Kopplung jenseits des SM

- Untersuchung in Anlehnung an eine effektive Feldtheorie (EFT)
 - Annahme: keine neue BSM–Physik unterhalb Cut–off–Skala Λ .
- Grenzfall: **Punktförmige** Wechselwirkung zwischen Higgs–Boson und Gluonen
- Annahme: SM–Zerfallsvertex



Beschreibung der Kopplungen mittels des *Higgs–Characterisation–Models*; SM Lagrangian erweitert, um anomale Kopplungen zu berücksichtigen (JHEP 11 (2013) 43) :

$$\mathcal{L} = \left\{ \underbrace{\kappa_{\text{SM}} \cos \alpha \left[\frac{1}{2} g_{\text{HZZ}} Z_\mu Z^\mu + g_{\text{HWW}} W_\mu^+ W^{-\mu} \right]}_{\text{SM-Wechselwirkung}} - \frac{1}{4} \left[\underbrace{\kappa_{\text{Hgg}} \cos \alpha g_{\text{Hgg}} G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu}}_{\text{BSM, } \mathcal{CP}\text{-gerade}} + \underbrace{\kappa_{\text{Agg}} \sin \alpha g_{\text{Agg}} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu}}_{\text{BSM, } \mathcal{CP}\text{-ungerade}} \right] \right\} \chi$$

$\kappa_{\text{SM}} \cos \alpha$

Abweichung von SM–Kopplungsstärke

$\kappa_{\text{Hgg}} \cos \alpha$

Stärke der \mathcal{CP} –geraden BSM–Wechselwirkung

$\kappa_{\text{Agg}} \sin \alpha$

Stärke der \mathcal{CP} –ungeraden BSM–Wechselwirkung

In dieser Studie: $\kappa_{\text{SM}} \cos \alpha = 1$, $\kappa_{\text{Hgg}} \cos \alpha = 1$

Higgs-Produktionsmechanismen

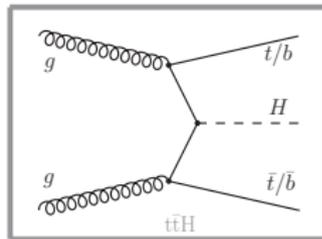
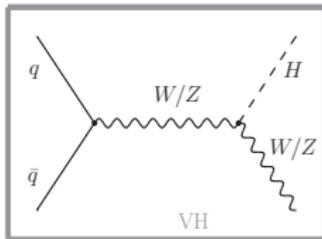
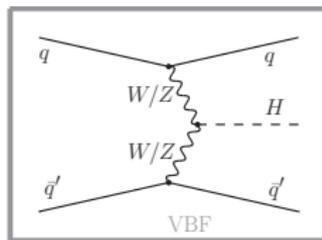
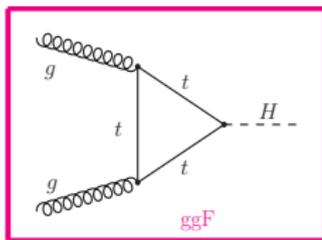
Hauptmechanismen für die Higgs-Produktion am LHC:

ggF Gluonfusion

VBF Vektorboson-Fusion

VH assoziierte Produktion mit Vektorbosonen

t \bar{t} H assoziierte Produktion mit schweren Quarks



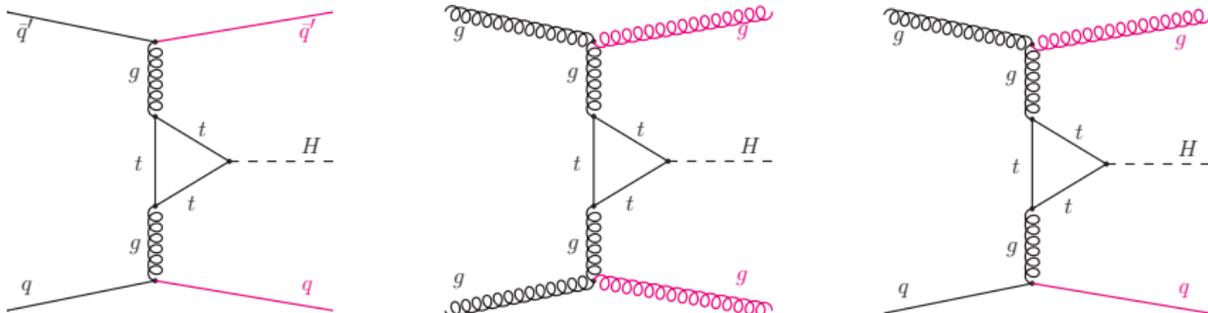
Produktion	x-sec[pb]
ggF	$48.58^{+5.0\%}_{-5.0\%}$
VBF	$3.78^{+2.1\%}_{-2.1\%}$
WH	$1.37^{+2.0\%}_{-2.0\%}$
ZH	$0.88^{+4.1\%}_{-3.5\%}$
t\bar{t}H	$0.51^{+6.8\%}_{-9.9\%}$

LHC Higgs Cross Section Working Group

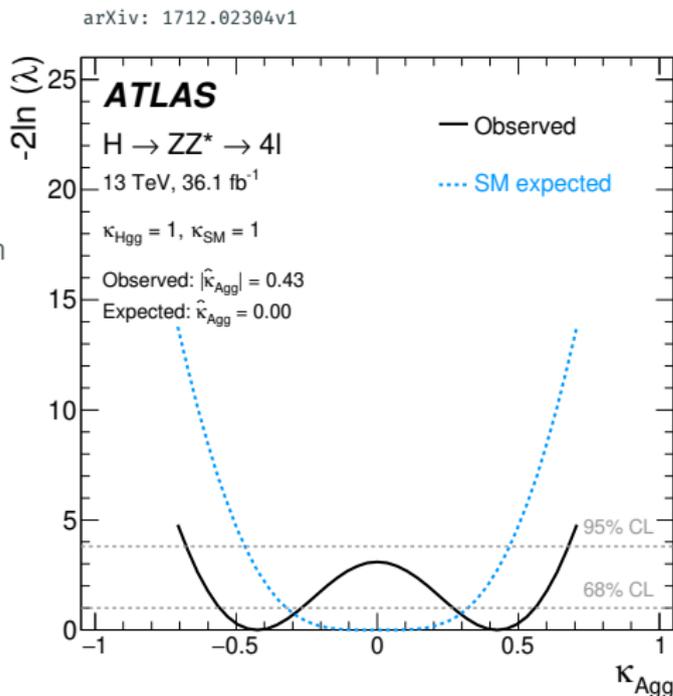
Gluonfusion (ggF)

- Hauptproduktionsmechanismus im Kanal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$.
- Bei der Produktion können zusätzliche **Jets** entstehen.
- Grob die Hälfte der ggF-Ereignisse sind ohne zusätzliche Jets.
- Ereignisse mit 2 oder mehr Jets machen in etwa 15% aus.

Exemplarisch: Feynman-Diagramme von ggF Prozessen mit 2 **Jets** im Endzustand:



- Bisherige Studien der anomalen Beimischungen zur Higgs–Gluon–Kopplung
- Keine Unterscheidung bzgl. dem Vorzeichen von κ_{Agg} möglich.



Motivation:

- Produktionsprozess $pp \rightarrow H + 2\text{jets}$ sensitiv auf \mathcal{CP} -Eigenschaften.
- Verteilung von $\Delta\phi_{jj}$ erlaubt Diskriminierung bzgl. $\cos\alpha \kappa_{\text{Agg}}$.

Definition:

- Azimutwinkel zwischen den Projektionen der zwei *führenden Jets* in der transversalen Ebene:

$$\Delta\phi_{jj} = \phi_{j1} - \phi_{j2}$$

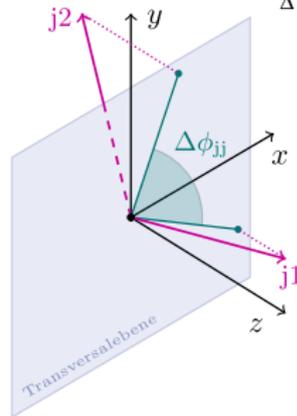
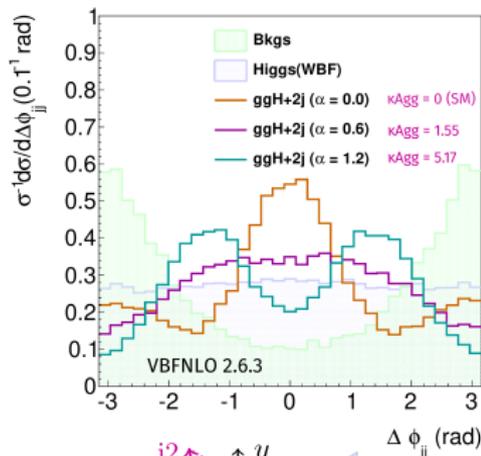
Wobei für die Rapiditäten: $y_{j1} \geq 0 > y_{j2}$.
(Schnitt auf unterschiedliche Hemisphären)

Zusätzliche Schnitte:

$$|\eta(H)| < 2.5 \quad p_T^{4\ell} > 70 \text{ GeV} \quad \Delta R_{jj} > 0.6$$

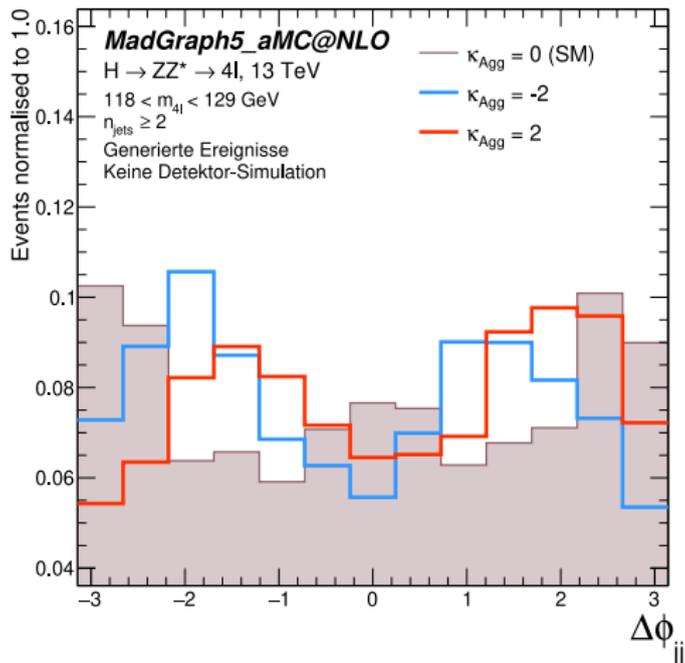
$$|\eta(j)| < 5 \quad p_T^j > 20 \text{ GeV} \quad m_{jj} > 400 \text{ GeV}$$

Phys. Rev. D 90 (2014) 073008



$\Delta\phi_{jj}$ im Higgs-Characterisation-Modell

- Monte Carlo ggF-Samples erstellt für verschiedene Werte von κ_{Agg} (MadGraph5_aMC@NLO)
- Sensitivität von $\Delta\phi_{jj}$ auf die Stärke und das Vorzeichen des anomalen Kopplungsparameters κ_{Agg} .
- Schnitte im Vergleich zu denen im Papier wesentlich lockerer (hauptsächlich $p_{\text{T}}^{4\ell}$ und m_{jj}).



Erwartungen bei 120 fb^{-1}

- Die erwartete integrierte Luminosität für RUN2 beträgt 120 fb^{-1} .
- Die Tabelle zeigt Anzahl der erwarteten ggF-Ereignisse N_{cat} in den 0-, 1- und 2-Jet-Kategorien für eine Auswahl an Parameterkonfigurationen.
- Die Zahlen sind für generierte Ereignisse (NLO).
- Die Rekonstruktionseffizienz wurde mithilfe eines Skalierungsfaktors berücksichtigt.

ATLAS Work in progress

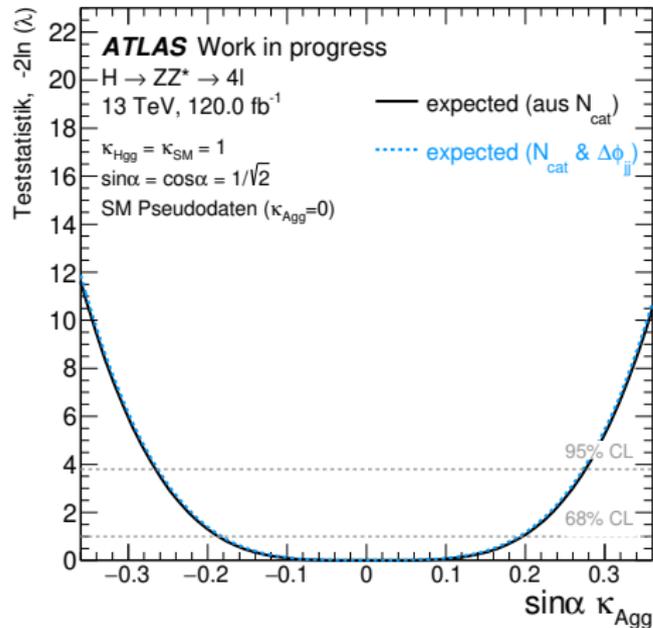
Kategorie	SM				pures BSM ($\kappa_{\text{Hgg}} = 0$)
	$\kappa_{\text{SM}} = 1$	$\kappa_{\text{SM}} = 1$	$\kappa_{\text{SM}} = 1$	$\kappa_{\text{SM}} = 1$	$\kappa_{\text{SM}} = 1$
	$\cos \alpha = 1$	$\cos \alpha = 1/\sqrt{2}$	$\cos \alpha = 1/\sqrt{2}$	$\cos \alpha = 1/\sqrt{2}$	$\cos \alpha = 1/\sqrt{2}$
	$\kappa_{\text{Agg}} = 0$	$\kappa_{\text{Agg}} = 0.5$	$\kappa_{\text{Agg}} = 1.55$	$\kappa_{\text{Agg}} = 2$	$\kappa_{\text{Agg}} = 1$
Gesamt	154.58	60.33	247.55	384.49	86.92
$n_{\text{jets}} = 0$	86.27	33.91	139.29	216.94	48.91
$n_{\text{jets}} = 1$	45.26	17.52	72.00	111.07	26.63
$n_{\text{jets}} \geq 2$	23.05	8.90	36.21	56.39	12.37

- Kategorie $n_{\text{jets}} \geq 2$: Statistik ist limitierender Faktor.

Setzen neuer Limits

Tests von verschiedenen κ_{Agg} -Hypothesen durch den Fit von der Ereigniszahl (N_{cat}) in 0-, 1- und 2-Jet-Kategorien (und der $\Delta\phi_{jj}$ -Verteilung) an die Pseudodaten.

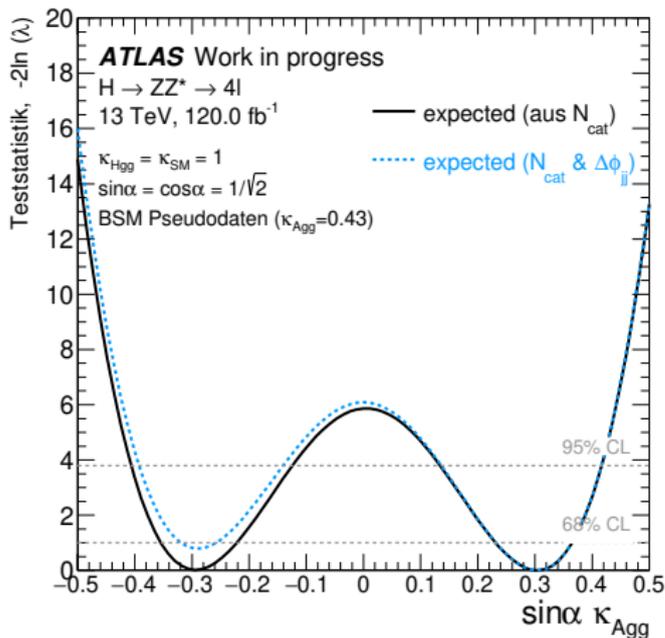
Ein Pseudo-Datensatz simuliert ein SM Signal ($\kappa_{\text{Agg}} = 0$).



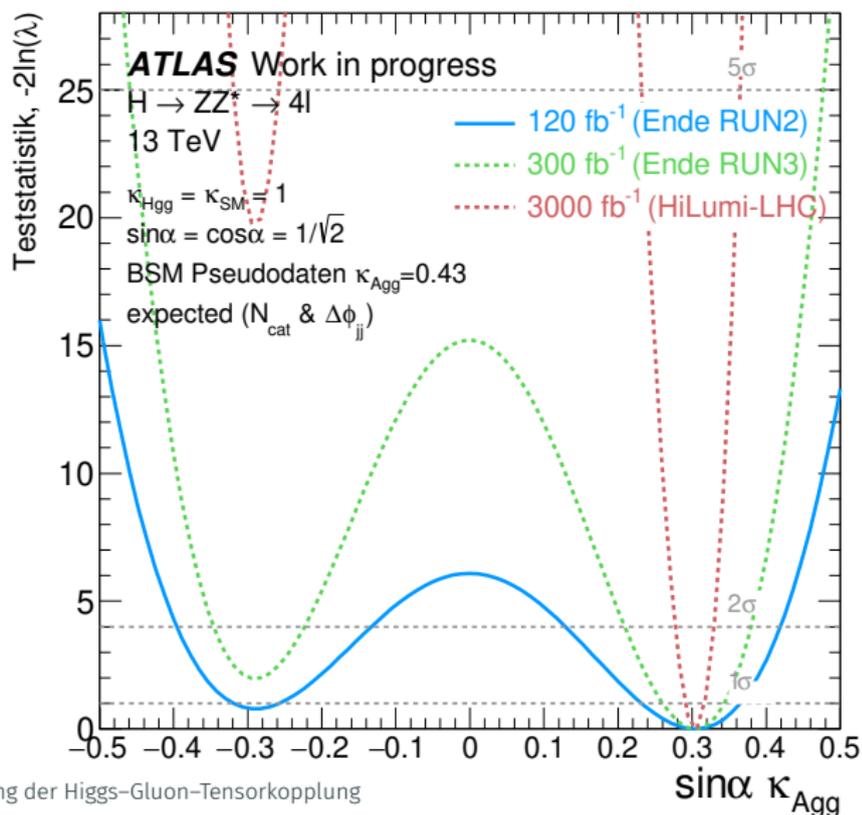
Setzen neuer Limits

Ein Pseudo-Datensatz simuliert ein Signal mit $\kappa_{\text{Agg}} = 0.43$.

Während bei Signalmodellierung mit Observable N_{cat} keine Aussage über das Vorzeichen von κ_{Agg} gemacht werden kann, wird mit $\Delta\phi_{jj}$ die Hypothese $\kappa_{\text{Agg}} = -0.43$ mit einem Konfidenzniveau (CL) von 68 % weniger bevorzugt wird.



Setzen neuer Limits – Ausblick auf höhere Luminositäten



ATLAS Work in progress

	120 fb ⁻¹		300 fb ⁻¹		3000 fb ⁻¹	
N_{cat}	-0.27	0.28	-0.21	0.22	-0.11	0.12
N_{cat} & $\Delta\phi_{jj}$	-0.26	0.27	-0.20	0.21	-0.11	0.12

- Ausschlussgrenzen bei 95 % Konfidenzniveau unter SM-Hypothese.
- Für integrierte Luminositäten von 120 fb⁻¹, 300 fb⁻¹ und 3000 fb⁻¹.
- Fits von N_{cat} bzw. N_{cat} & $\Delta\phi_{jj}$ für SM Pseudodaten.

- Bisherige Messungen: Eigenschaften des Higgs-Bosons sind konform mit SM-Vorhersagen, aber BSM-Physik nicht ausgeschlossen.
- Modelle jenseits des Standardmodells: Higgs-Boson kein reiner CP -gerade Zustand, sondern Überlagerung von CP -geraden und CP -ungeraden Zustand.
- In der $Gluonfusion$ können in höherer Ordnung Jets erzeugt werden, deren Eigenschaften sensitiv auf nicht-SM-Beiträge in der Higgs-Gluon-Tensorkopplung sind.
- Der Azimutwinkel $\Delta\phi_{jj}$ wurde als diskriminierende Variable im Kanal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ untersucht.
- Erste Ergebnisse zeigen eine vielversprechende Sensitivität auf das Vorzeichen der anomalen Kopplung.
- Die Sensitivität der Analyse kann unter Einsatz der Matrix-Element-Methode verbessert werden.