

Ergebnisse vom LHC

-

Fortsetzung BSM und Perspektiven

PD Dr. Jeanette Lorenz
(Fraunhofer IKS
& LMU München)

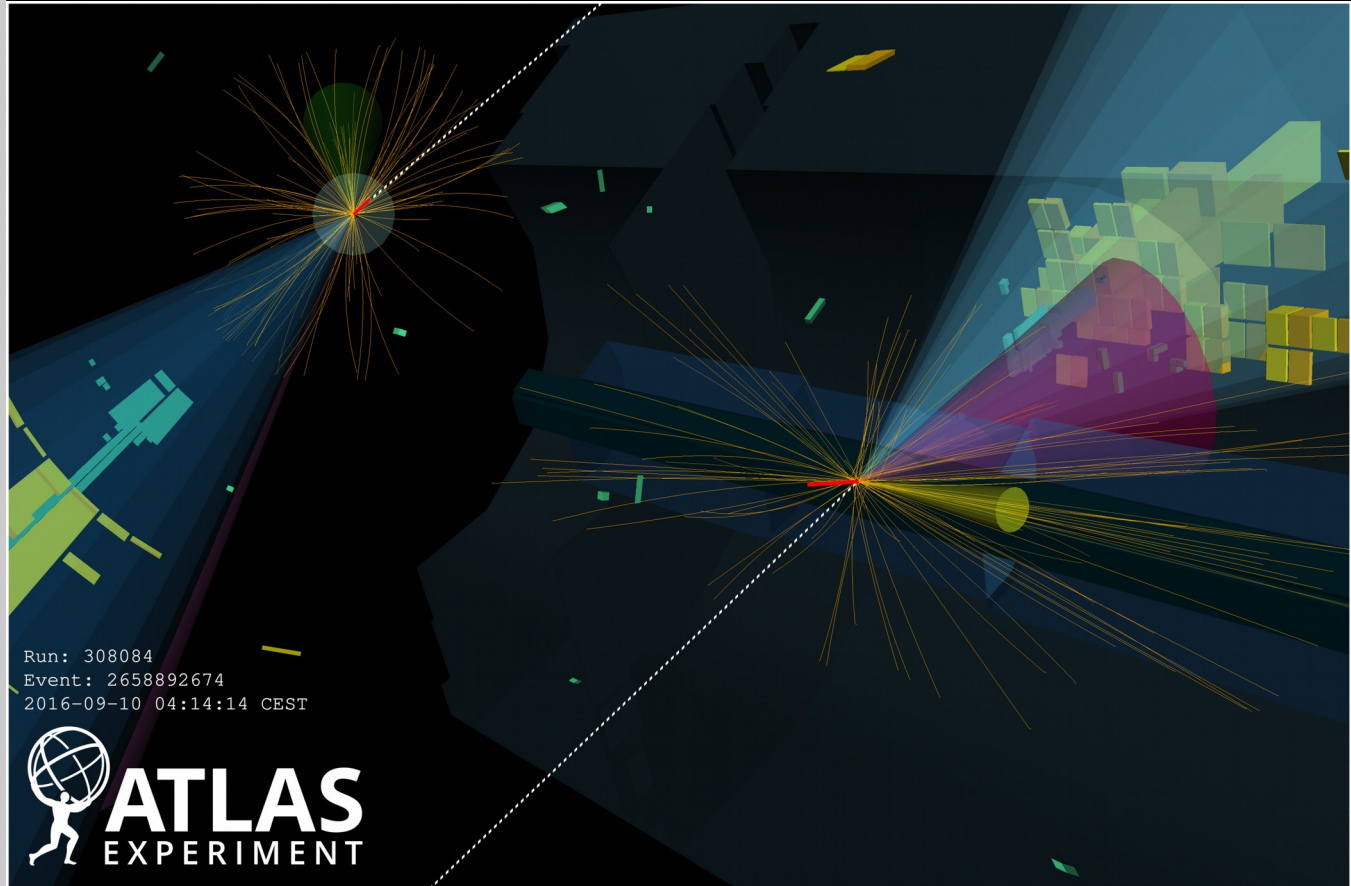


Fraunhofer
IKS



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Maria-Laach Herbstschule 2021,
03.08.2021



Ein Blick in die Zukunft: einfach noch mehr BSM-Suchen?

Recap: Das SM hat offensichtliche Probleme:

- Dunkle Materie,
- Materie-Antimaterie-Symmetry,
- Stabilisierung der Higgs-Masse,
- Hinweise auf Anomalien: $g_{\mu} - 2$, Anomalien im Flavoursektor.

Bislang bestätigen jedoch alle Messungen und Suchen das SM sehr präzise.

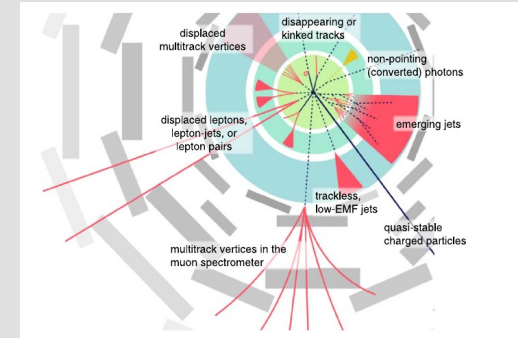
Wo also schauen?

- Der LHC ist eine sehr leistungsstarke Maschine – möglich nach sehr seltenen oder schwierigen Signaturen zu schauen.
- Andere Experimente?



[<https://www.symmetrymagazine.org/article/the-status-of-supersymmetry>]

Langlebige Teilchen



Warum nach langlebigen Teilchen suchen?

[J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 (2020) 090501]

Bislang noch keine BSM-Physik entdeckt, aber wohlmotiviert

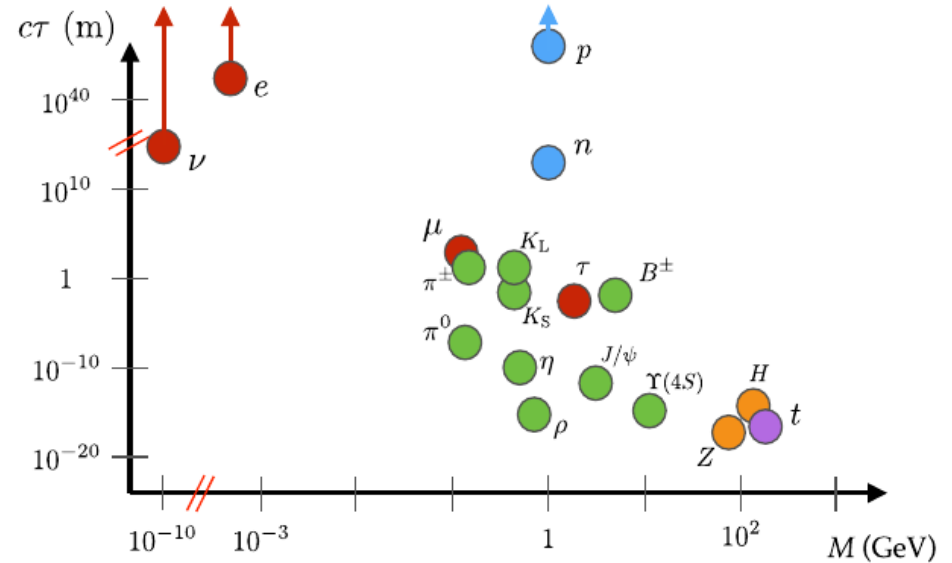
→ Vielleicht am falschen Platz geschaut? Viele BSM-Theorien sagen langlebige Teilchen (LLP) voraus.

Z.B. wegen:

- (angenäherte) Symmetrien, die LLP stabilisieren,
- Kleine Kopplungen zwischen LLP und SM-Teilchen.
- Unterdrückter Phasenraum für Zerfall, z.B. weil Zustände annähernd Masse-entartet.

Jedoch: Standard-Rekonstruktionsmethoden nehmen meistens prompte Teilchen an.

Auch das SM ist voll von langlebigen Teilchen!



Wie nach LLP suchen?

[J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 (2020) 090501]

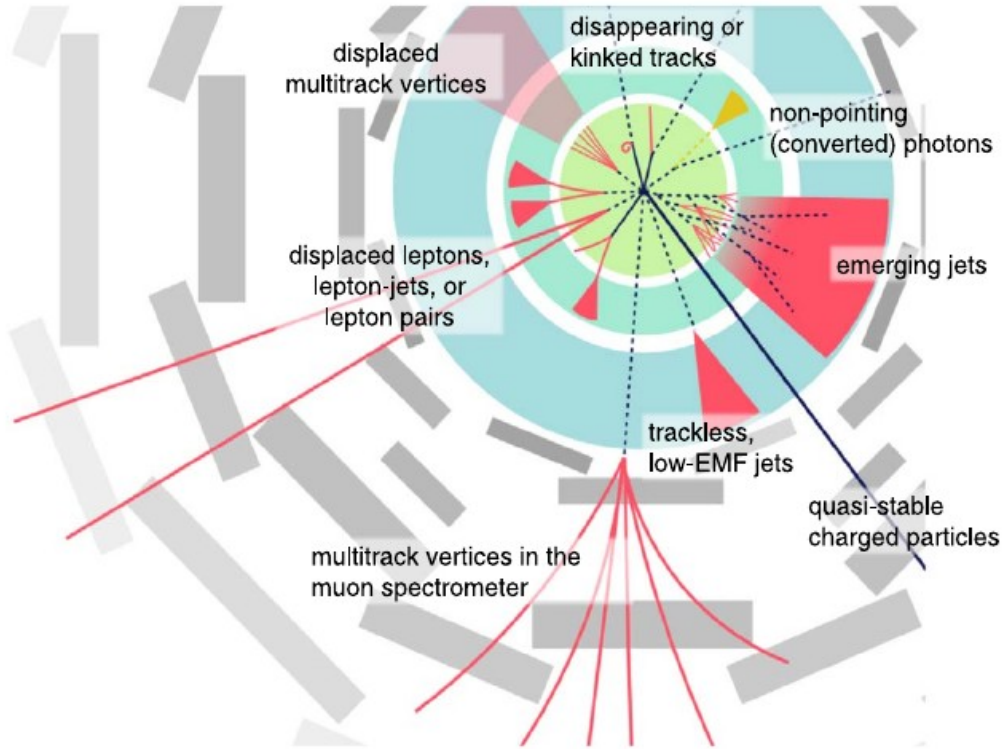
LLP resultieren häufig in keinen Standardsignaturen.

→ Eher SM-Untergrund-frei, aber auch spezielle Rekonstruktionstechniken oder gar Experimente erforderlich.

Z.B.

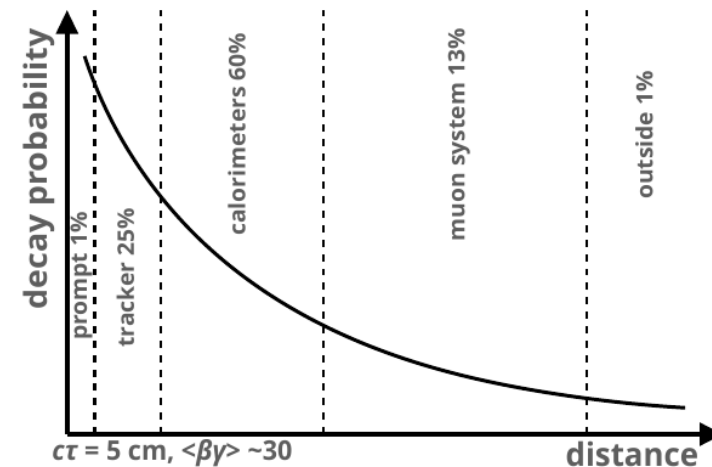
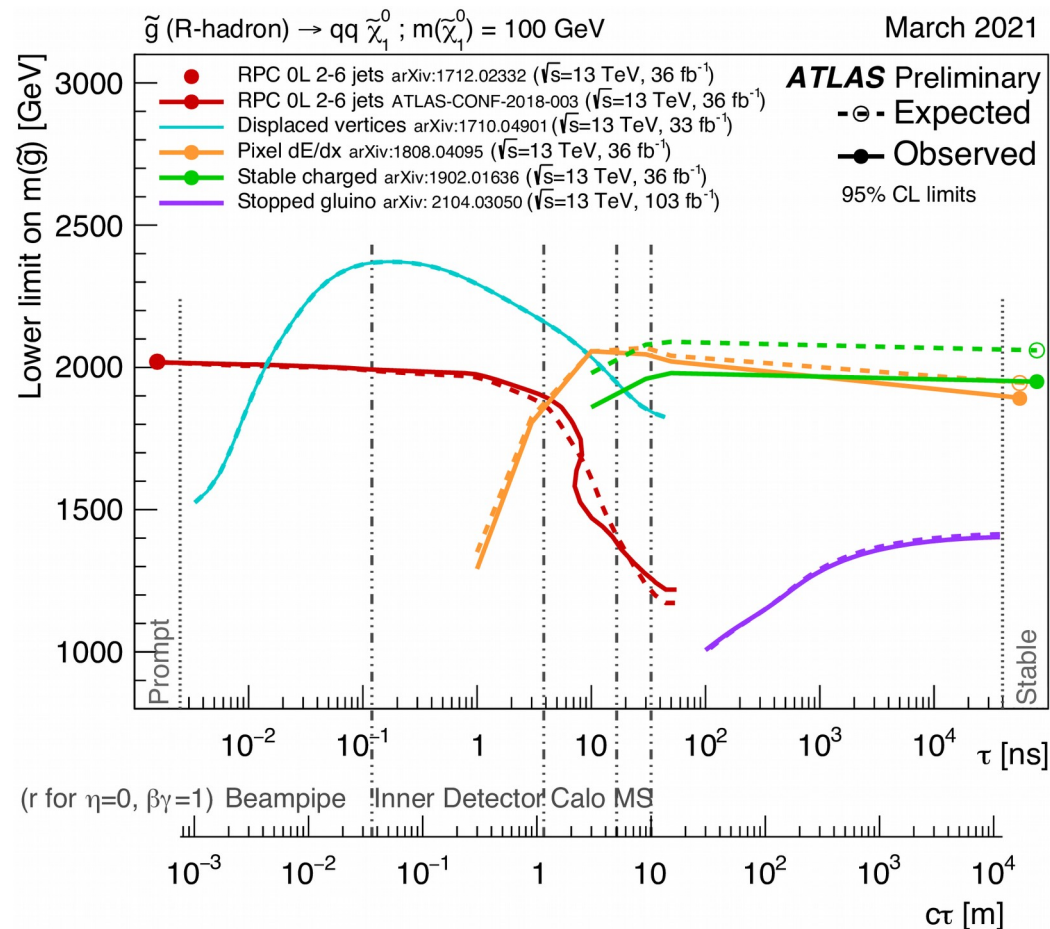
- Spuren mit ungewöhnlicher Ionization,
- Lokalisierte Energieablagerungen in Kalorimetern ohne Spuren,
- Gestoppte Teilchen mit verzögerten Zerfall,
- **verschwindene/auftauchende Spuren, oder mit Ecke**

Häufig unterschiedliche Suchstrategien möglich, da die echte Lebenszeit zu einem exponentiell abfallenden Zerfall führt.



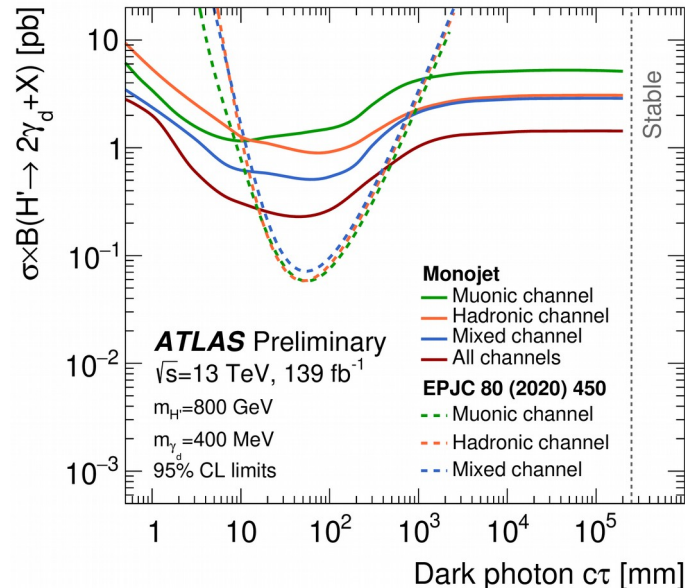
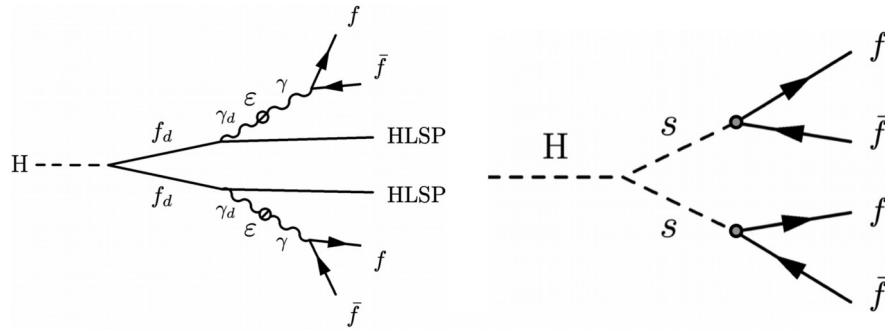
Reinterpretation von prompten Suchen

[ATL-PHYS-PUB-2021-019]



Teilweise dennoch möglich prompte Suchen für langlebige Teilchen zu reinterpretieren – hier eine Suche nach Squarks und Gluinos in Multi-Jet-Signaturen.

Außerdem spezifische Suchen nach langlebigen Teilchen sensitiv zu verschiedenen Lebenszeiten.



Mono-Jet Analyse auch sensitiv zu Modellen mit langlebigen Teilchen:

Dark Photon Modell: Zusätzlicher Dark Sector, der z.B. an ein Higgs-Boson koppelt. Entstehung von Dark Fermions mit Zerfällen in Dark Photons. Mischt mit SM Photon $\rightarrow$ displaced Vertices.

Higgs-Zerfälle in langlebige Skalare mit Zerfällen in SM-Teilchen $\rightarrow$ displaced Vertices. Bei ISR gegebenenfalls mono-Jet Signatur.

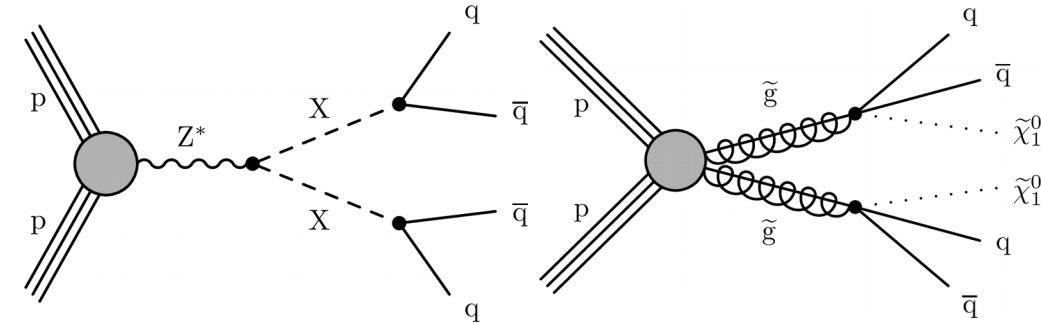
Mono-Jet Analyse kann reinterpretiert werden.

Z.B. sensitiv zu Dark Photon-Modellen bei unterschiedlichen Eigenlebenszeiten – komplementär zu speziellen Dark-Photon-Suchen.

Mehr Infos zu Reinterpretationstechniken im Backup.

Displaced Jets

[arXiv:2012.01581]

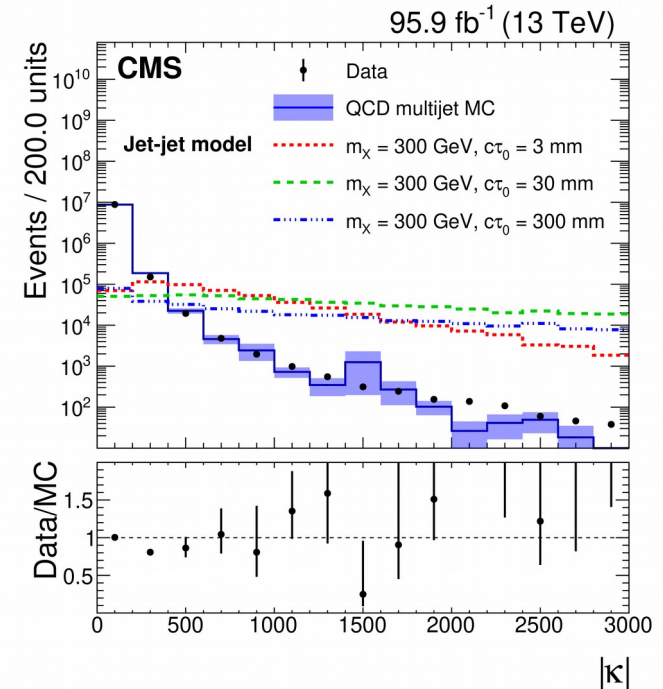


In vielen Modellen zerfallen langlebige Teilchen weiter in Jets → ‘displaced Jet’

Z.B. Mediator-Teilchen Z^ zerfällt in langlebige Teilchen X ; oder split SUSY mit langlebigen Gluino wegen entkoppelten sehr schweren Squarks.*

Suche nach zwei displaced Jets:

- Spezielle Trigger für displaced Jets,
- Hohes H_T für Dijet-Kandidaten,
- Displaced Sekundärvertex aus assoziierten Spuren.
- Gradient Boosted Decision Tree basierend auf diversen geometrischen Variablen

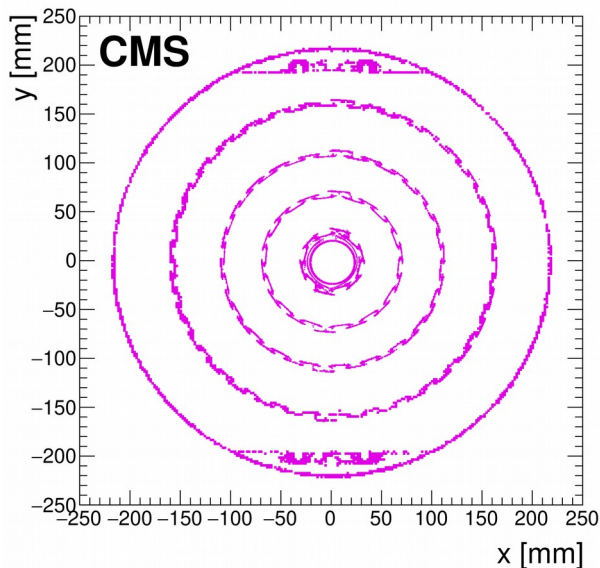


Einige spezialisierte Variablen, z.B. Summe der gerichteten Signifikanz der Impaktparameter:

$$\kappa = \sum_{i=1}^6 \text{Sig}[\text{IP}_{2D}(\text{track}_i)]$$

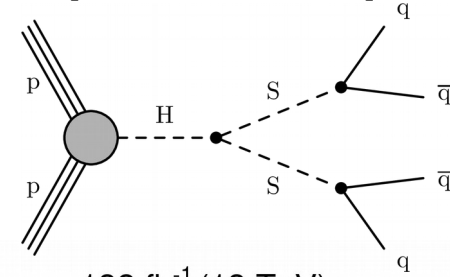
Displaced Jets

[arXiv:2012.01581]

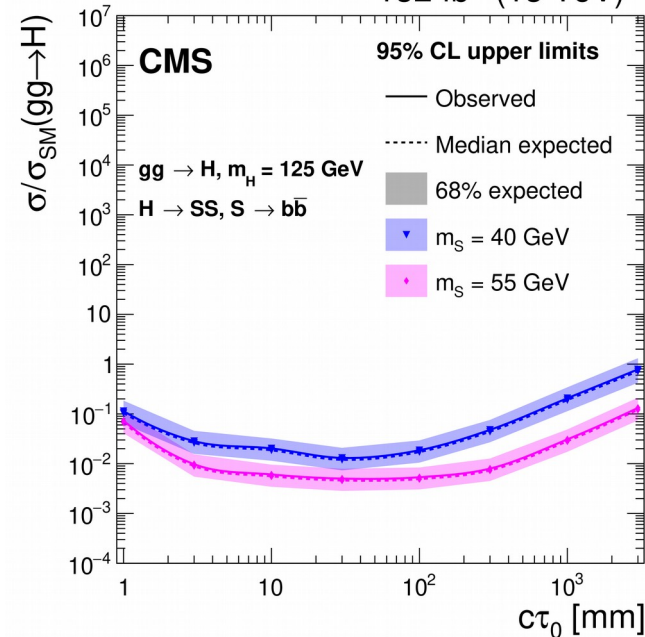


Wichtige Untergründe:

- **Nukleare Wechselwirkungen** zwischen Teilchen und Detektormaterial, → Erstellen einer Veto-Map für SV basierend auf Material im Inner Tracker.
- **Fehlidentifizierte displaced Vertices** durch zufälliges Treffen von Spuren.
- **Langlebige SM-Hadronen.**



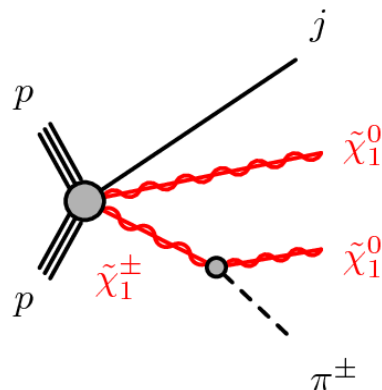
132 fb⁻¹ (13 TeV)



Ein Ereignis in SR beobachtet, konsistent mit Untergrunderwartung.
→ vermutlich von Materialinteraktion mit Silicon Strip Detektor.

Diverse Ausschlussgrenzen, z.B. in einem Modell mit exotischen Higgs-Zerfällen in LLP mit Zerfällen in Bottom-Quarks:
BR > 10% für Zerfallslängen von 2 bis 530mm für $m(S) > 40$ GeV.

Disappearing tracks

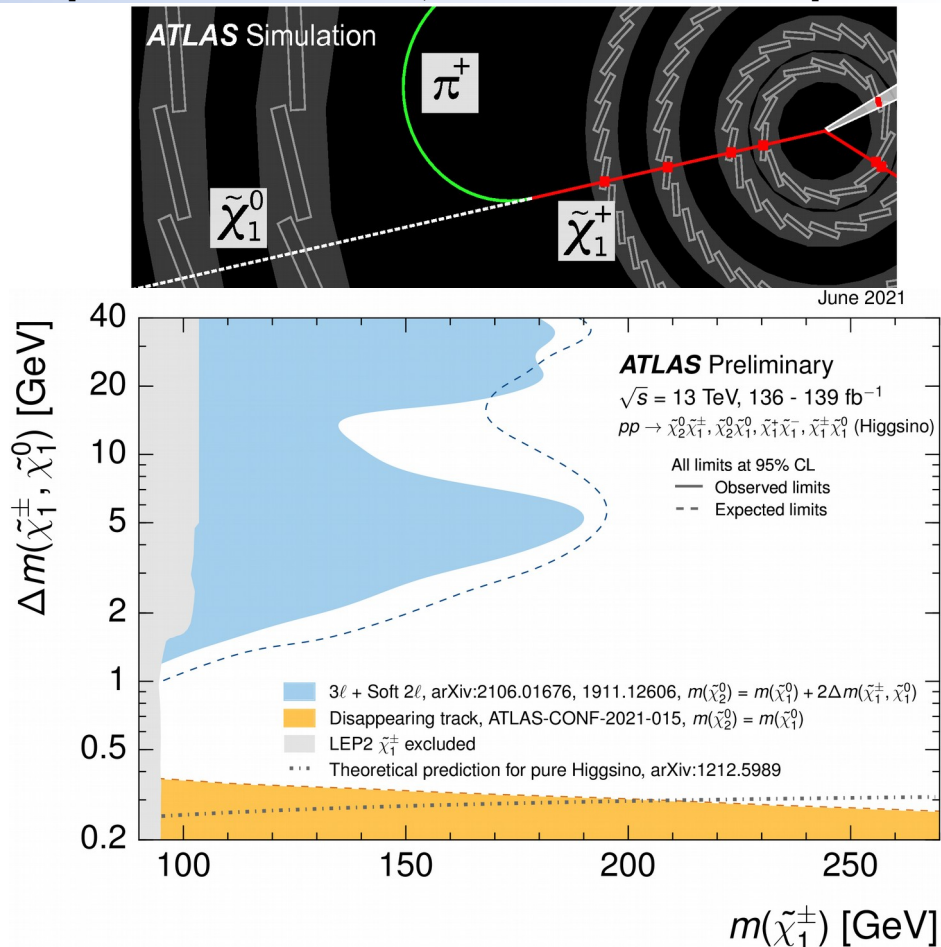


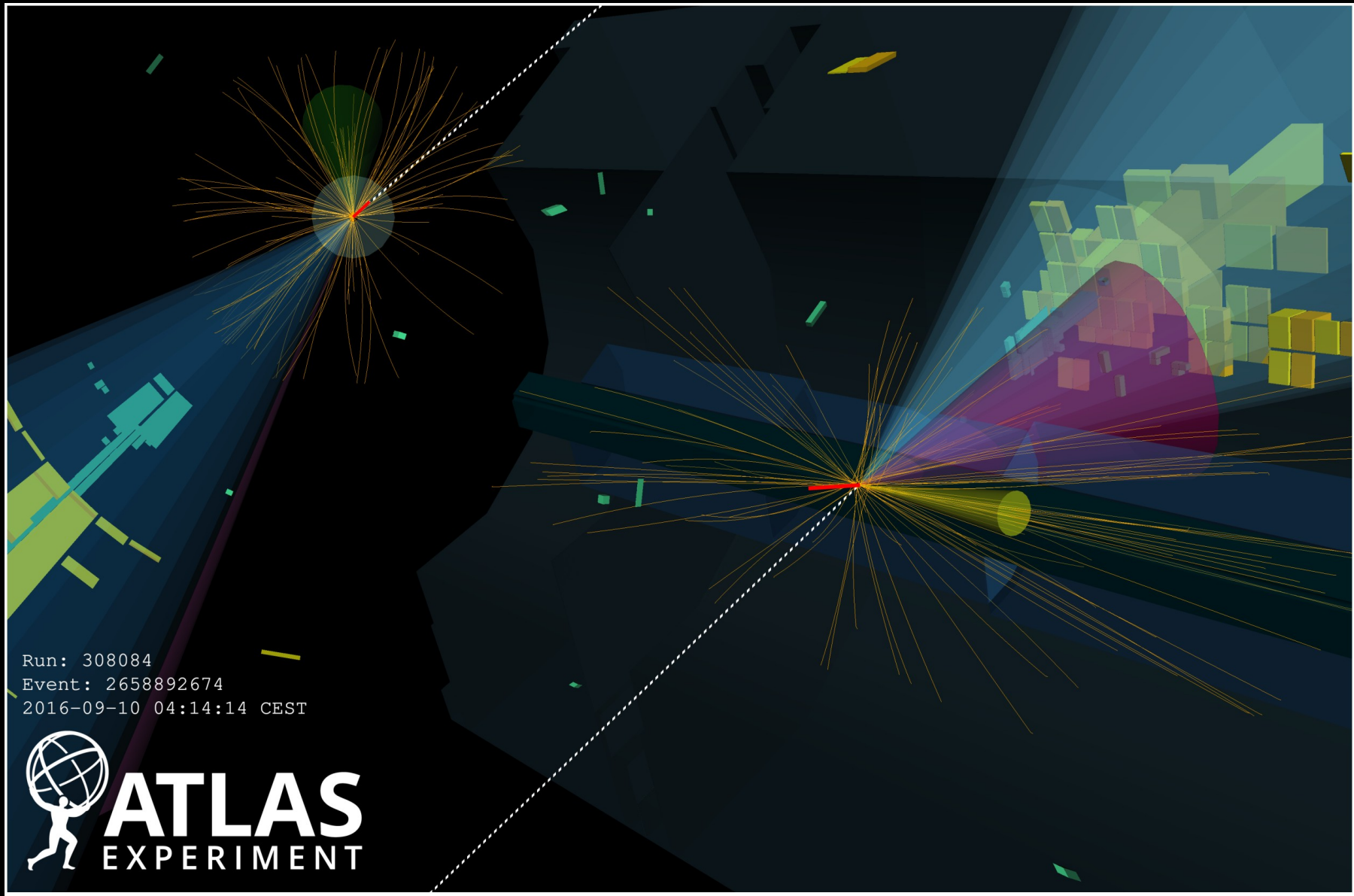
Ein langlebiges Chargino zerfällt in ein unsichtbareres Neutralinos und ein Pion
→ *Verschwundene Spur*.

Einbau der Insertable B-Layer (IBL) im Long-Shutdown zwischen Run-1 und Run-2 erlaubt die Rekonstruktion kleinerer minimaler Spurlängen beginnend bei 12cm.

→ *Pixel-only Tracklets*

[ATLAS-CONF-2021-015, ATL-PHYS-PUB-2021-019]





Run: 308084

Event: 2658892674

2016-09-10 04:14:14 CEST



ATLAS
EXPERIMENT

Neue Experimente

[J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 (2020) 090501]

Aktuelle LHC-Experimente (ATLAS, CMS, LHCb) haben keine Sensitivität zu extrem leichten, extrem langlebigen Teilchen, oder solchen ungewöhnlicher Ladung.

→ Serie von weiteren Experimenten/Detektoren vorgeschlagen, die evtl zeitnah installiert werden könnten.

Z.B. *Hodoscope for Ultra-Stable neutral pArticles* (**MATHUSLA**)

- außerhalb von ATLAS oder CMS

- LLP mit Lebenszeiten $\tau > 100$ m

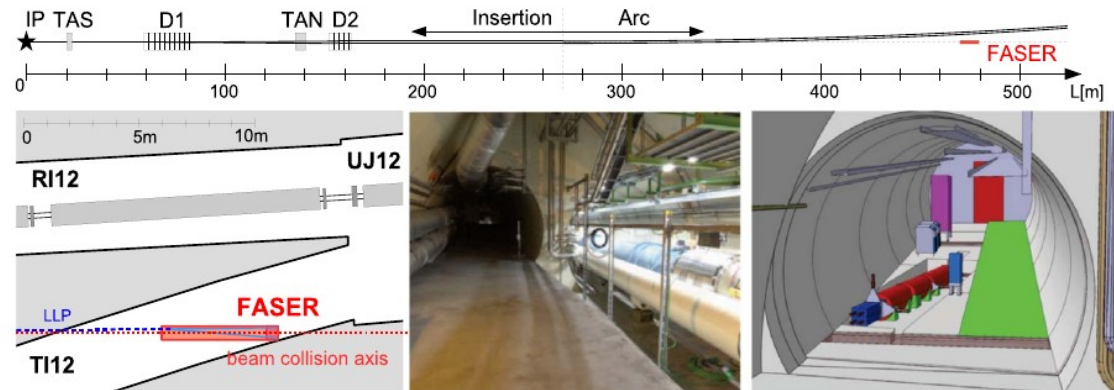
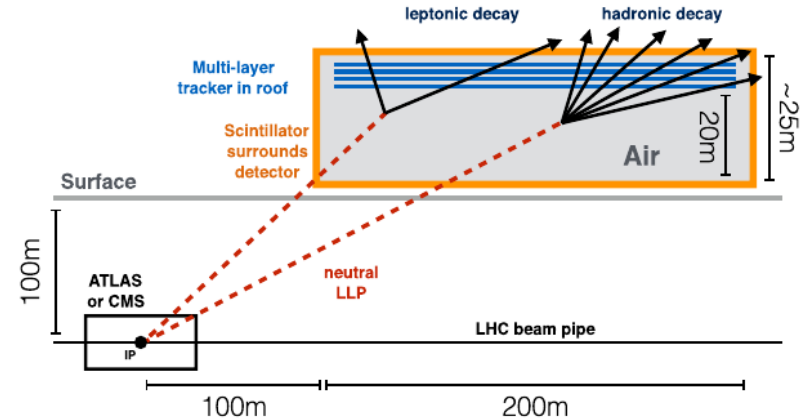
- Relativ simples Trackersystem mit 5 Ebenen.

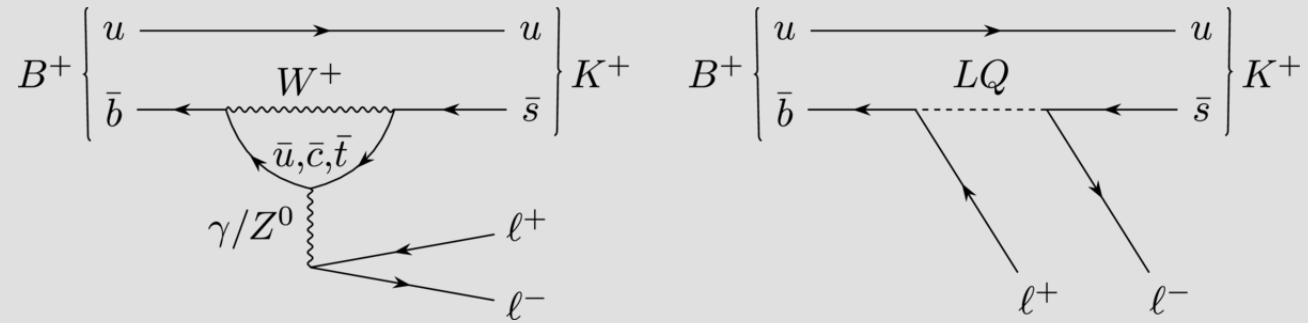
The forward search experiment (**FASER**)

- in der extremen Forwardregion von ATLAS oder CMS

- sensitiv zu leichten (MeV oder GeV) sehr schwach gekoppelten LLPs.

- Teilchen mit sehr geringen p_T .





Lepton-Flavour-Universalität und Leptoquarks

Anomalien in der B-Physik – B^+ - Zerfälle

[LHCb-PAPER-2021-004 & Nature Physics]

Im SM sind FCNC auf Tree-Level verboten, in BSM-Erweiterungen jedoch möglich – BSM-Erweiterungen könnten Produktionsrate erhöhen oder verringern, oder Winkelvariablen verändern.

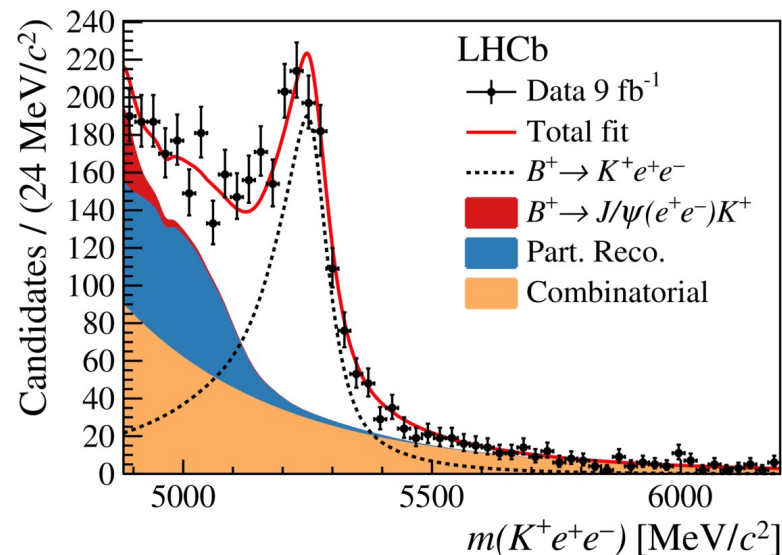
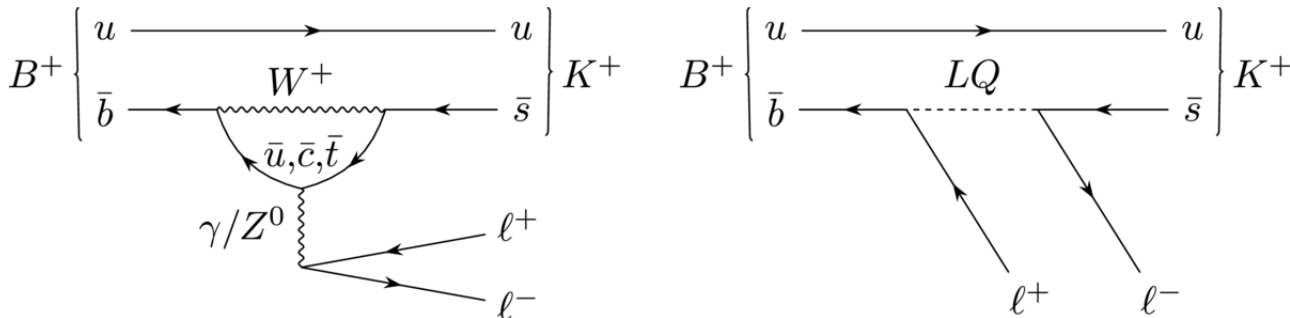
→ z.B. in Theorien mit Leptoquarks

BSM-Erweiterungen könnten Lepton-Universalität verletzen.

→ Test auf Leptonzahlverletzung mittels Verhältnis:

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K^+)}$$

Vorteil: hadronische Unsicherheiten in theoretischen Vorhersagen kürzen sich.



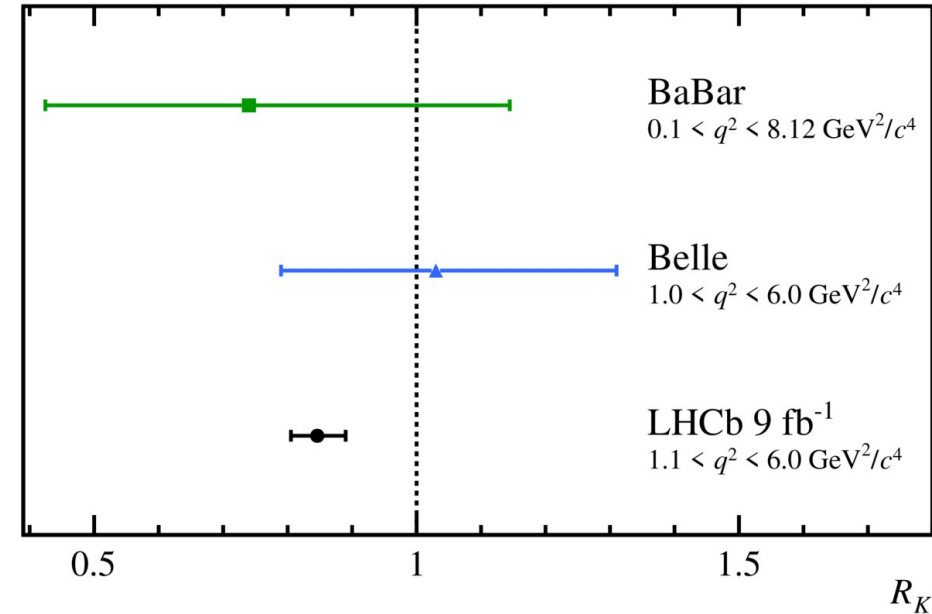
- Aktualisierte Analyse von LHCb unter Verwendung des Run1 + Run2 Datensatzes.
- Systematische Unsicherheiten reduziert – insbesondere Bremsstrahlung von Elektronen relevant, sowie das unterschiedliche Detektorsysteme für Elektronen und Myonen verwendet werden.
- In der Formulierung von R_K kürzen sich jedoch wichtige systematische Unsicherheiten heraus – die Prozessraten von Zuständen mit K^+ müssen nur relativ zu denen mit J/ψ verstanden werden.

Ergebnis:

$$R_K = 0.846^{+0.044}_{-0.041}$$

→ Abweichung zur SM-Erwartung von 3.1σ

→ **evidence** für Lepton-Universalitäts-Verletzung

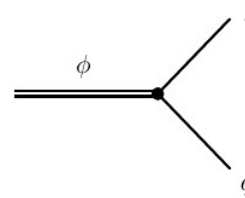


Leptoquarks

- Leptoquarks in vielen BSM-Erweiterungen vorhergesagt, insbesondere **GUT und Modellen mit Quark-Leptonen-Unterstruktur**.
- Hypothetische Teilchen, die Quark-Lepton-Übergänge meditieren, d.h. **tragen Leptonen- und Baryonenzahl**.
- Tragen Farbladung und drittelzahlige elekt. Ladung, Spin 0 oder 1, links- und rechts-händig koppelnd.
- Zerfälle nach Quark und Lepton, **innerhalb einer Familie dominant**.
- Anomalien bevorzugen Leptoquarks der dritten Generation und Kopplung über Generationen.

Suchstrategien:

- Vorwiegend Suche nach Paarproduktion,
- Dijet + Leptonpaar, oder Lepton + Neutrino, hohes p_T .



	j	b	t
ν			
ℓ			
τ			

[arXiv:1706.05033]

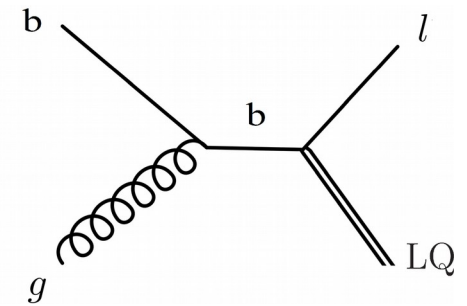
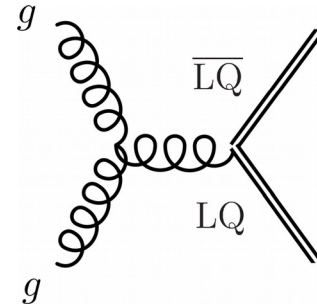
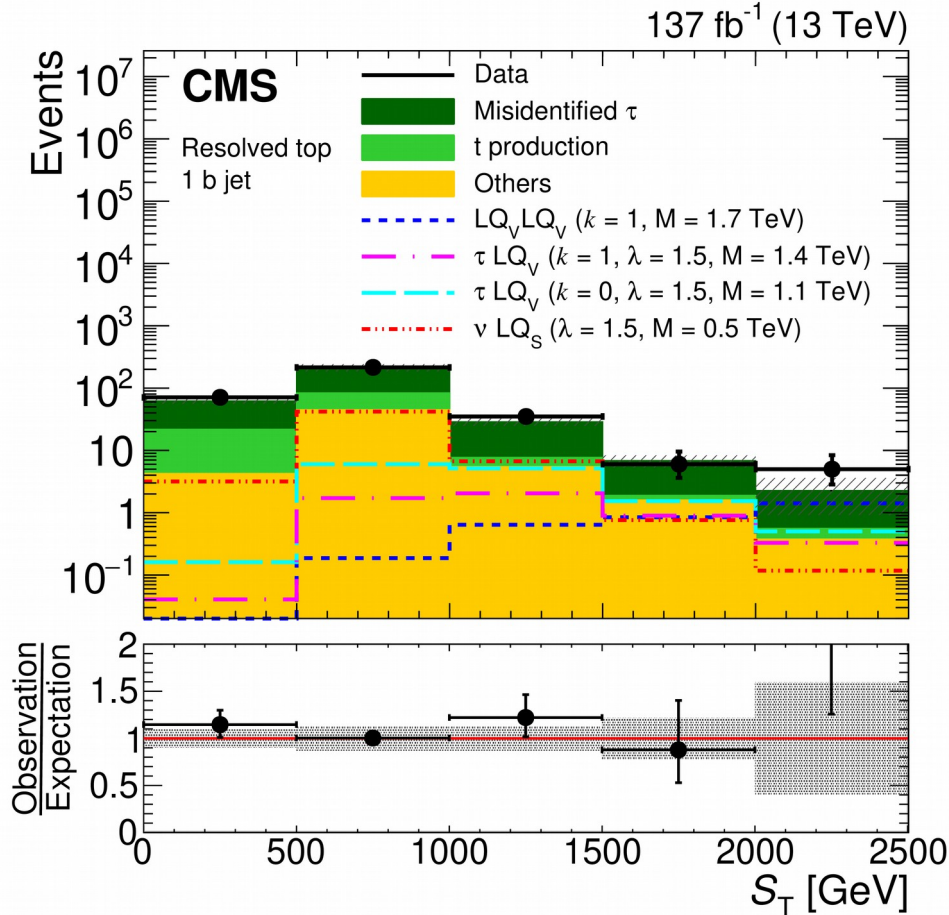
	<u>u,d</u>	<u>c,s</u>	<u>t,b</u>
e, ν	✓	✓	✓
μ, ν	✓	✓	✓
τ, ν	✗	✗	✓

[Edson Carquin]

(Aktuell von ATLAS und CMS berücksichtigte Endzustände)

Suche nach Leptoquarks in dritter Generation

[Phys. Lett. B 819 (2021) 136446]



Suche für skalare und Vektor-Leptoquarks, einzeln oder paarweise produziert ($LQ_S \rightarrow \tau\tau/b\nu$ oder $LQ_V \rightarrow \tau\nu/b\tau$).

Signaturen: $\tau\nu$ (LQ) oder $tb\tau\nu$ (LQLQ)

Ereignisselektion via Top- oder W-Tagging mit finaler diskriminierender Variable

$$S_T = p_T(t) + p_T(\tau) + E_T^{\text{miss}}$$

→ Fit in diesen Variablen.

Suche nach Leptoquarks in dritter Generation

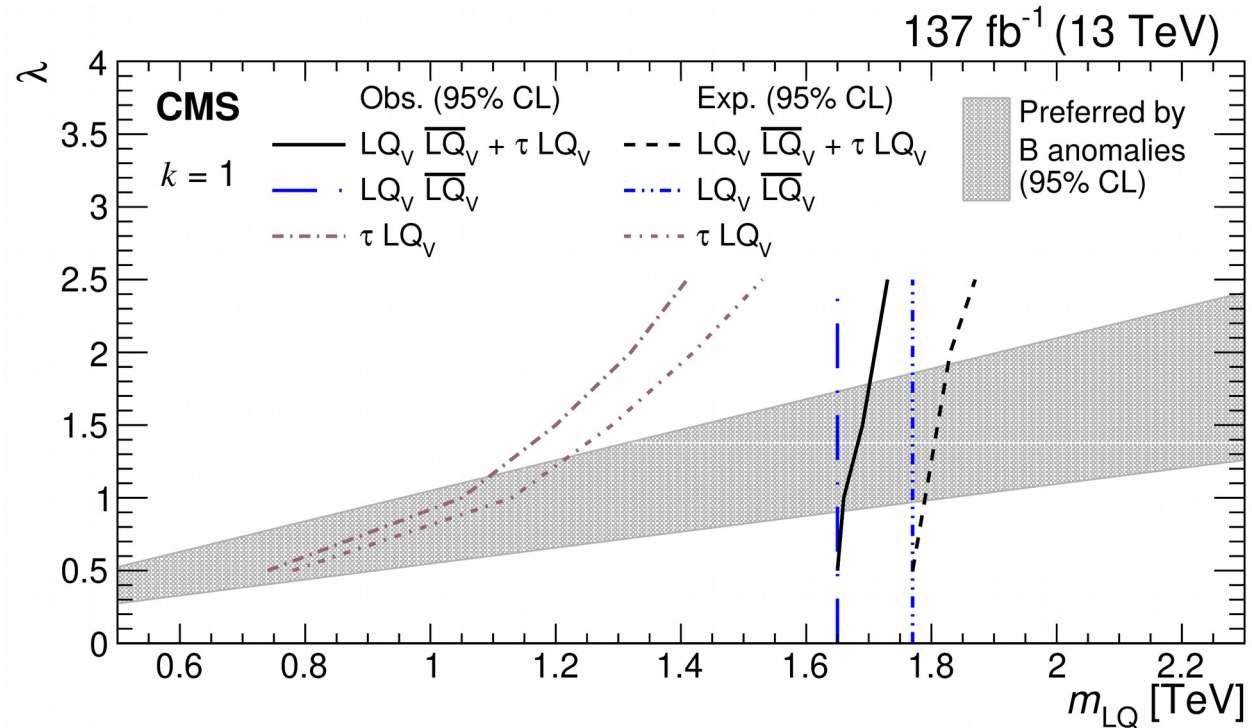
[Phys. Lett. B 819 (2021) 136446]

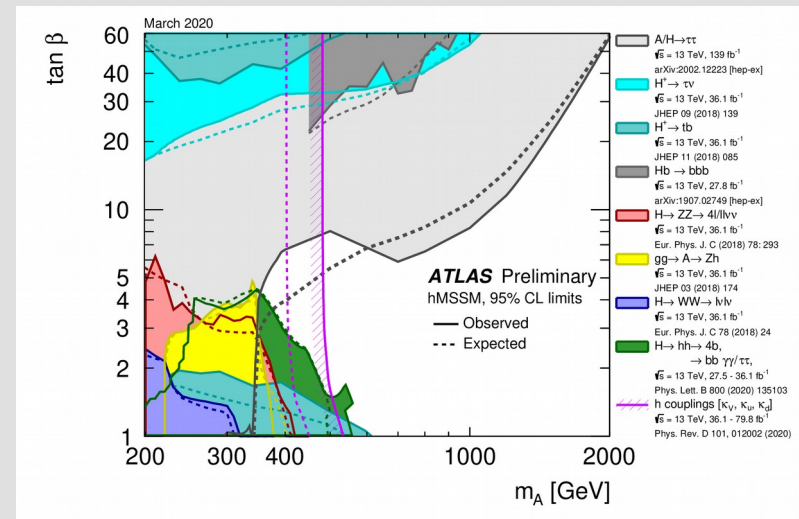
Irreduzible Untergründe mit echten Taus, oder Tops, mittels Simulation und Normierung in Kontrollregionen bestimmt.

Untergründe mit Fake Taus via der 'Fake-Factor-Methode'.

Keine signifikante Abweichung von SM-Erwartungen beobachtet.

→ Ausschlußgrenzen:
Z.B. in λ (LQ-Kopplung zu Quark und Lepton) versus Leptoquarkmasse – grau schattierte Fläche von speziellen Modellen, die B-Anomalien erklären könnten, bevorzugt.

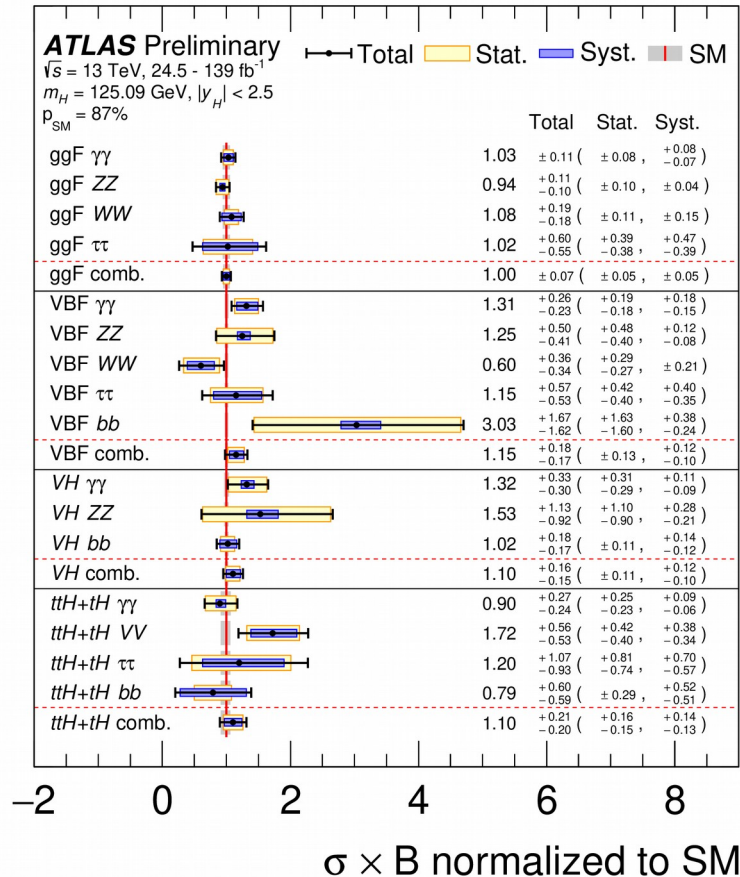




Weitere Higgs-Bosonen, BSM-Zerfälle, und Higgs-Selbstwechselwirkung

Kombination Verzweigungsverhältnis und Wirkungsquerschnitt

[ATLAS-CONF-2020-027]



Statistische Kombination von Produktions- und Zerfallsmodi:

- Mehrere Produktionsmodi für $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, $H \rightarrow WW^*$, $H \rightarrow \tau\tau$,
- $H \rightarrow b\bar{b}$ in VH, VBF und $t\bar{t}H$ Produktion,
- $t\bar{t}H$ in multi-Lepton Signaturen,
- ($H \rightarrow \mu\mu$),
- ($H \rightarrow$ invisible (siehe morgen)).

Für die Kategorien mit ausreichender Statistik Berechnung einer Produktions- + Zerfallskanal-abhängigen Signalstärke durch einen Fit aller Kanäle:

$$\mu_{if} = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{SM}} \times \frac{B_f}{B_f^{SM}}$$

Gute Übereinstimmung mit Standardmodell-Vorhersagen.

Messungen der Kopplungsstärken

[ATLAS-CONF-2020-027]

→ Im sogenannten κ -Framework.

Reparametrisiere:

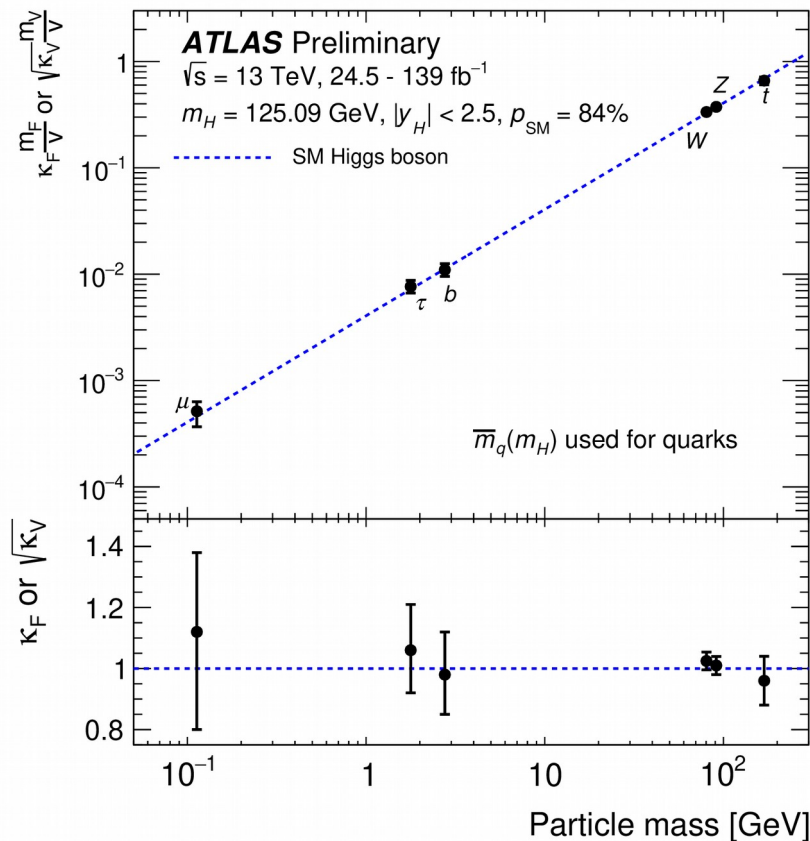
$$\sigma_i \times B_f = \frac{\sigma_i(\kappa) \times \Gamma_f(\kappa)}{\Gamma_H}$$

Mit: $\kappa_j^2 = \frac{\sigma_j}{\sigma_j^{\text{SM}}}$ oder: $\kappa_j^2 = \frac{\Gamma_j}{\Gamma_j^{\text{SM}}}$

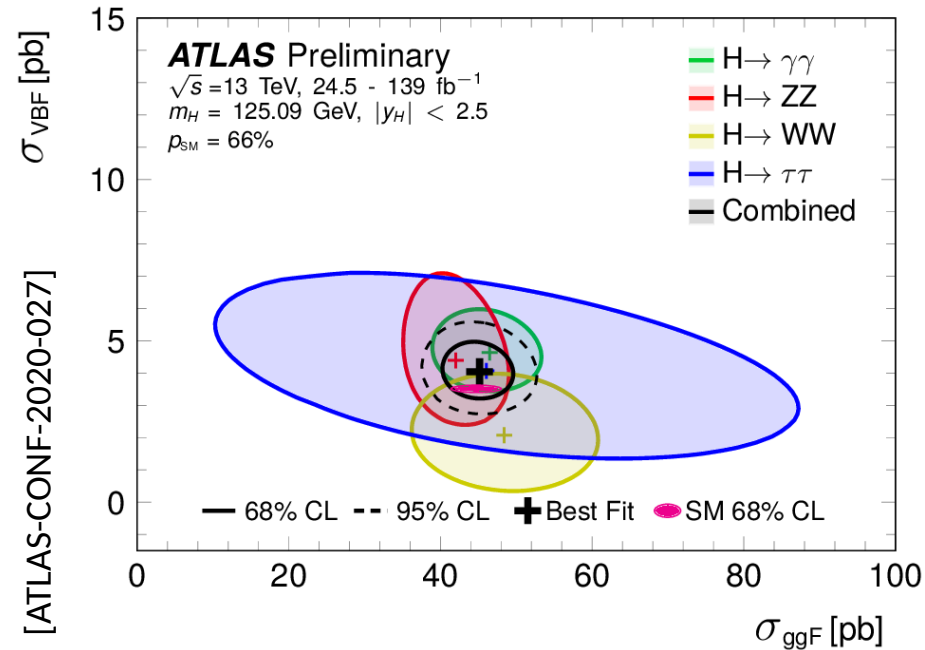
Daraus ergeben sich die reduzierten Kopplungsstärke-Skalierungsfaktoren:

$$y_V = \sqrt{\kappa_V} \frac{g_V}{2v} = \sqrt{\kappa_V} \frac{m_V}{v} \quad y_F = \kappa_F \frac{g_F}{\sqrt{2}} = \kappa_F \frac{m_F}{v}$$

→ Gute Übereinstimmung mit Erwartungen vom Standardmodell.



Weitere Higgs-Bosonen?



Bislang exzellente Übereinstimmung der Messungen mit den Erwartungen für ein SM Higgs-Boson.

Jedoch sagen viele BSM-Erweiterungen zusätzliche Higgs-Bosonen voraus, z.B. Two-Higgs-Doublet Modelle (2HDM), wie auch für SUSY benötigt wird:

- Zwei neutrale CP-gerade Higgs-Bosonen (h, H),
- Ein CP-ungerades Higgs-Boson (A),
- Zwei geladene Higgs-Bosonen ($H^{\pm}$).

Andere Erweiterungen sagen auch doppelt geladene Higgs-Bosonen voraus.

Zusätzlich sind BSM-Zerfälle des SM-Higgs-Bosons relevant – z.B. zu einer hypothetischen Kopplung zu DM.

Suchprogramm nach weiteren Higgs-Bosonen

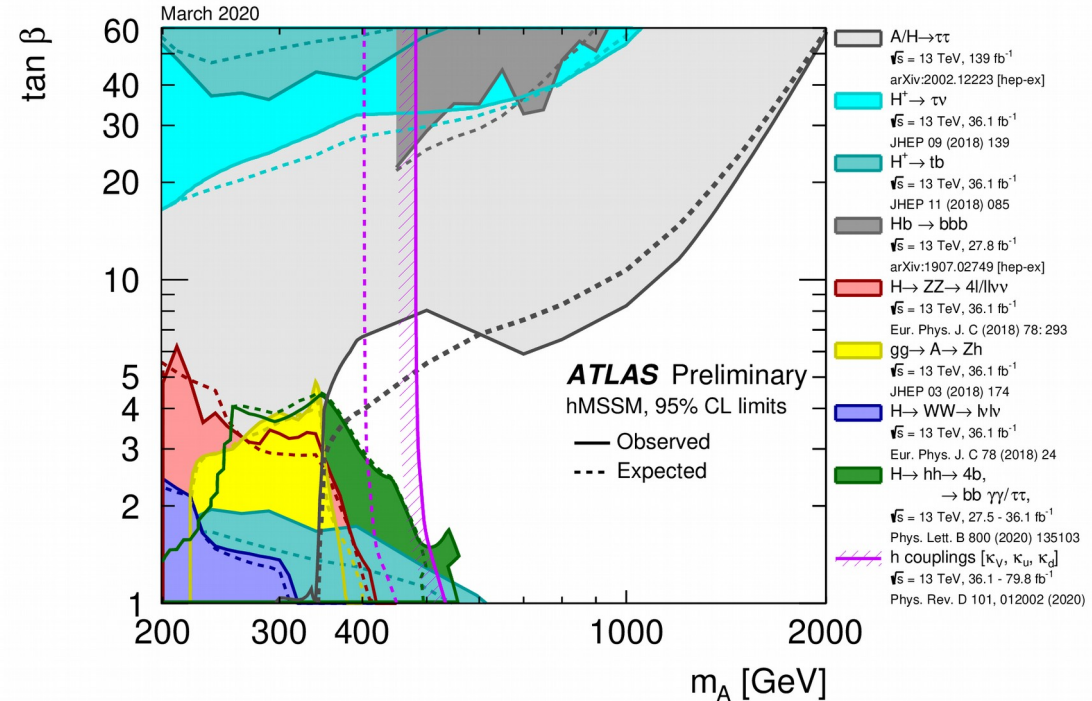
Daher umfassendes Suchprogramm für zusätzliche Higgs-Bosonen bzw. Weiteren Spin-0-Teilchen.

Indirekte Suchen:

- Präzisionsmessungen der Higgs-Kopplungen, und Reinterpretation in BSM-Erweiterungen.
- Auch in Suchen für DM.

Direkte Suchen:

- Suchen nach zusätzlichen neutralen Higgs-Bosonen in allen möglichen Zerfallskanälen (ZZ , WW , $Z\gamma$, $\gamma\gamma$, Zh , hh , $\tau\tau$, $t\bar{t}$, $b\bar{b}$),
- Suchen nach geladenen Higgs-Bosonen,
- Suchen nach doppelt geladenen Higgs-Bosonen,
- Suchen nach unsichtbaren Zerfällen des SM-Higgs-Bosons, und in andere Higgs-Bosonen.



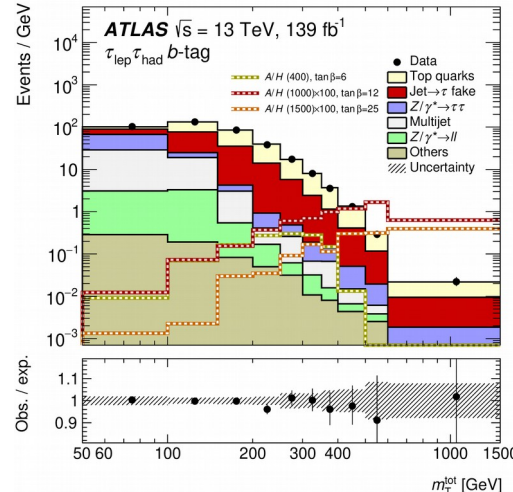
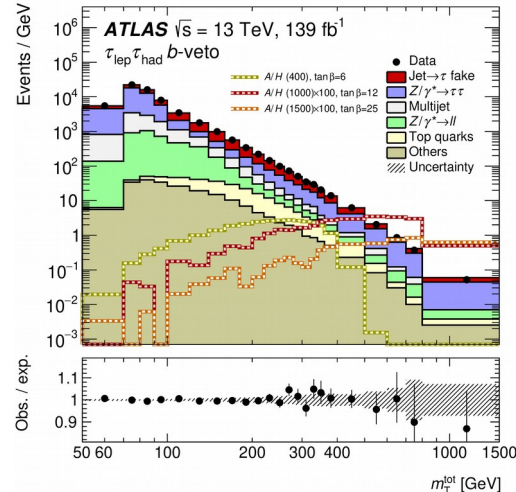
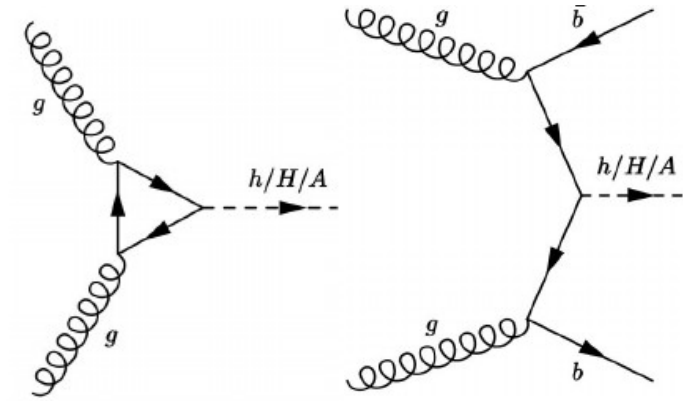
Suche nach $A/H \rightarrow \tau\tau$

[Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 051801]

→ Suche nach einem neuen schweren (Pseudo)Skalar.

- Zerfälle in Di-Tau Endzustände sind möglicherweise erhöht im Vergleich zu anderen Zerfallsmoden in einem Typ-II 2HDM, insbesondere bei hohen $\tan(\beta)$ Werten.
- Endzustände berücksichtigt mit leptonisch und hadronisch zerfallenden Tau ($\tau_{\text{lep}} \tau_{\text{had}}$) oder beide hadronisch ($\tau_{\text{had}} \tau_{\text{had}}$)

Identifiziert mittels BDT



- Suchkategorien via Forderung eines B-Tags für assoziierte Produktion, und eines B-Vetoos für ggF-Produktion.

- Rekonstruktion der Di-Tau-Masse mittels:

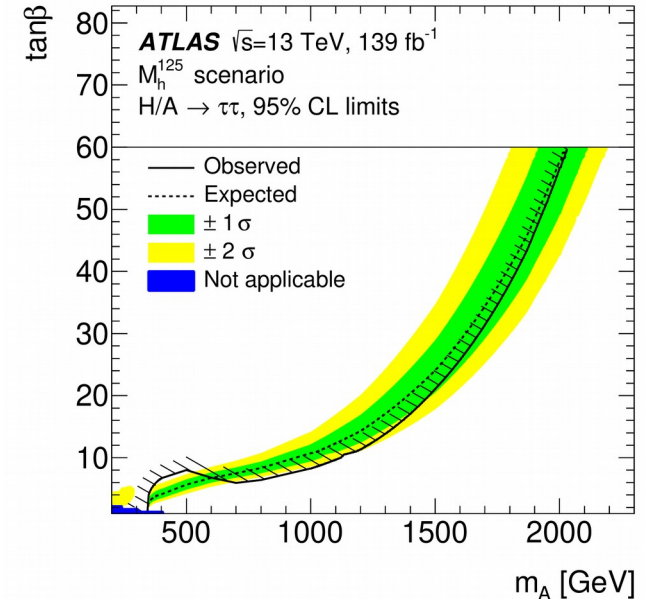
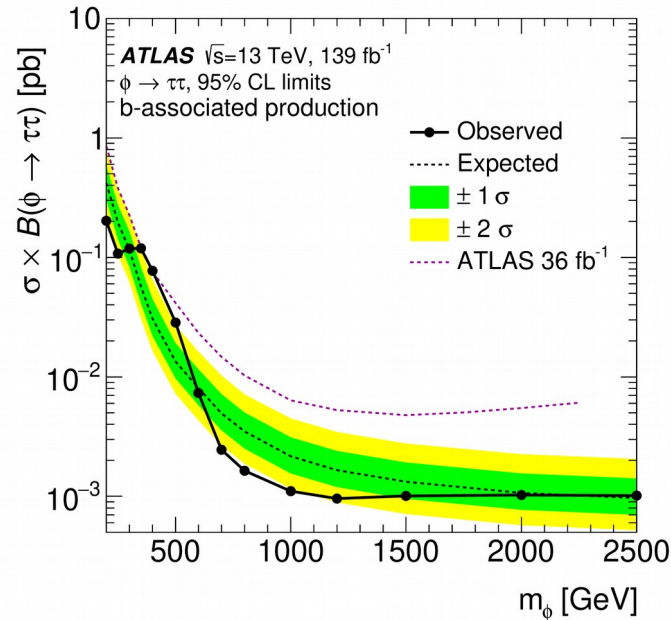
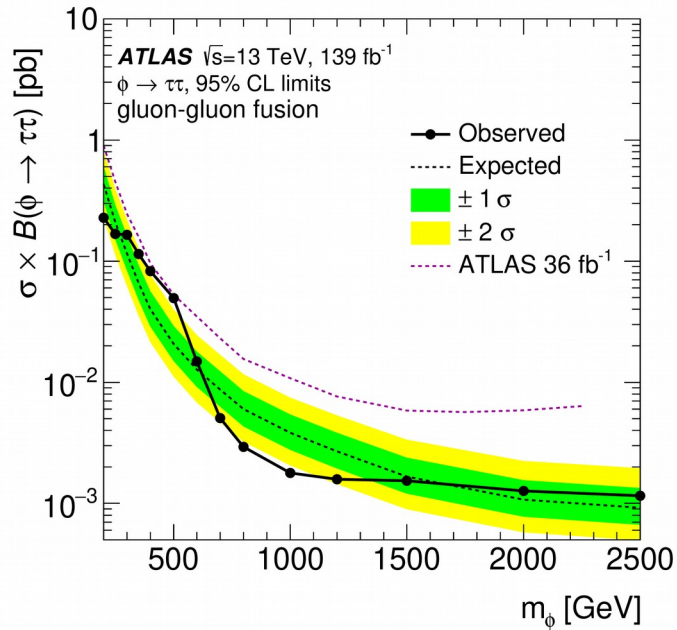
$$m_T^{\text{tot}} = \sqrt{(p_T^{\tau_1} + p_T^{\tau_2} + E_T^{\text{miss}})^2 - (\mathbf{p}_T^{\tau_1} + \mathbf{p}_T^{\tau_2} + \mathbf{E}_T^{\text{miss}})^2}$$

- Dominanten Untergründe ($t\bar{t}$, W +jets, und Multi-jet) mittels einer datengestützten Methode bestimmt.

Ausschlussgrenzen für $A/H \rightarrow \tau\tau$

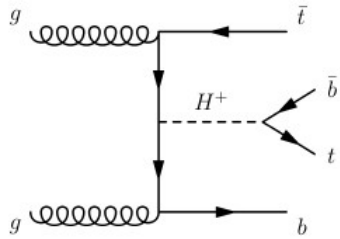
[Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 051801]

- Keine signifikante Abweichung zwischen Daten und SM-Untergrunderwartung beobachtet.
- Interpretation in unterschiedlichen 2HDM Varianten.
- Z.B. Ausschluss von $\tan(\beta) > 21$ für $m_A = 1.5$ TeV.



Suche nach $H^+ \rightarrow tb$

[JHEP 06 (2021) 145]



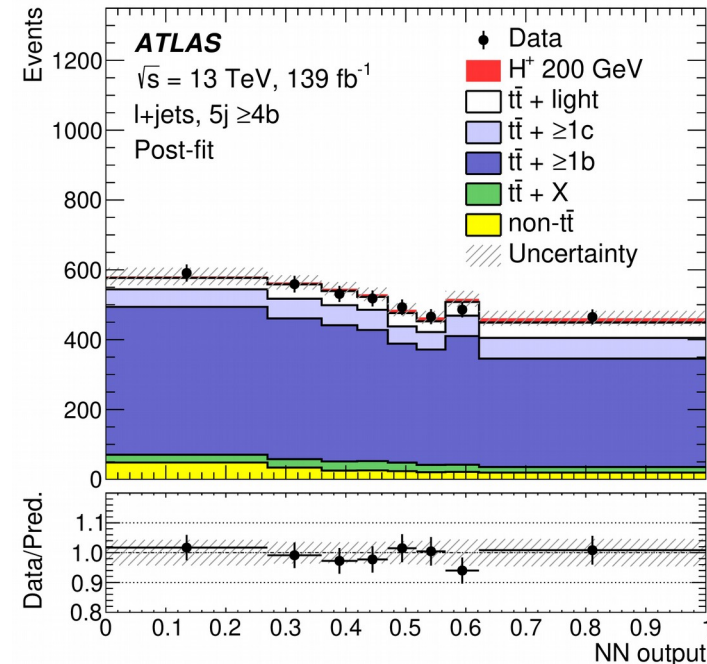
Geladene Higgs-Bosonen werden in vielen BSM-Erweiterungen vorhergesagt.

→ Im 2HDM mit $\cos(\beta-\alpha) \sim 0$ dominiert der Zerfall $H^+ \rightarrow tb$ für $m(H^+) > 200$ GeV.

→ *Suche nach einem H^+ produziert in Assoziation mit einem Top- und einem Bottom-Quark in Endzuständen mit Elektron oder einem Myon.*

→ Verschiedene Ereigniskategorien mit verschiedenen Jet-Multiplizitäten und b-tagged Jets (5 Jets + 3 or ≥ 4 b-Jets, ≥ 6 Jets + 3 or ≥ 4 b-Jets) .

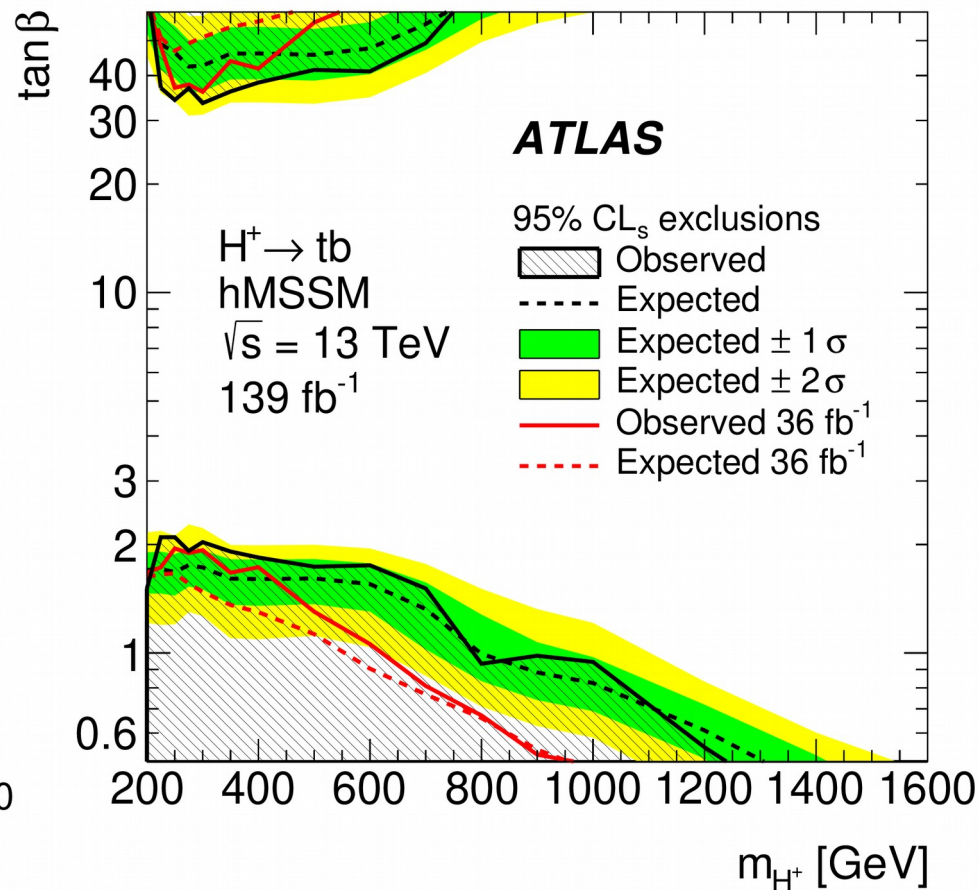
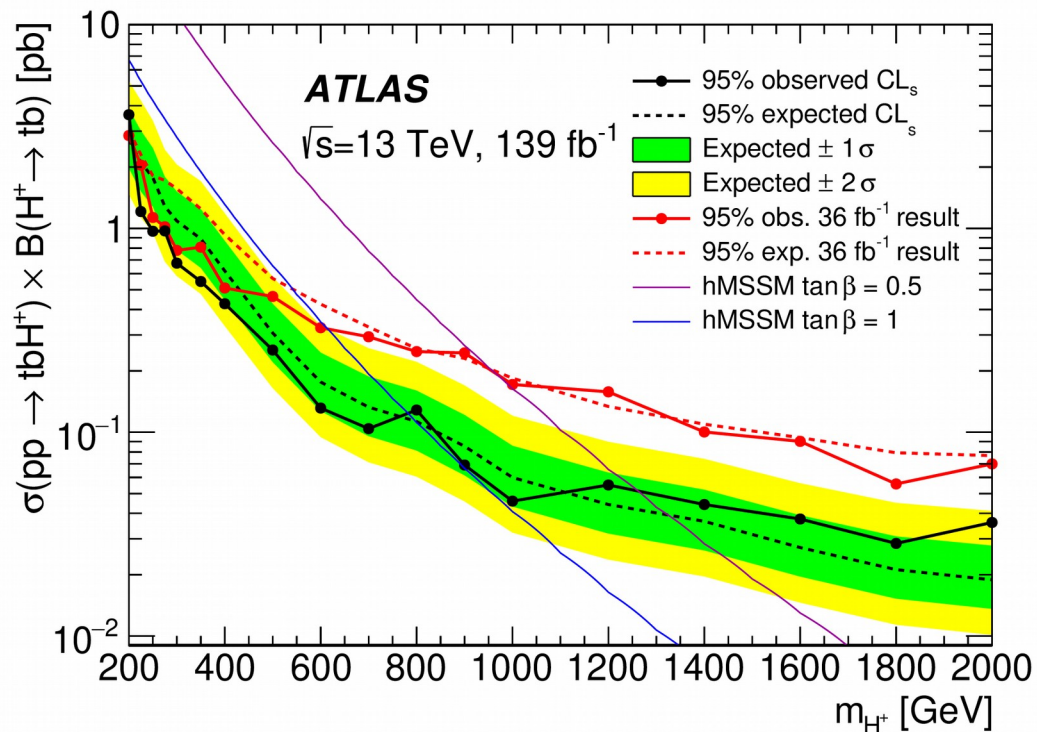
Neuronales Netzwerk trainiert auf Parameter bezogen auf den (transversalen) Impuls, Energien, Massen und räumliche Separierung der Jets, einschließlich unterschiedlicher H^+ Massen.



$H^+ \rightarrow tb$

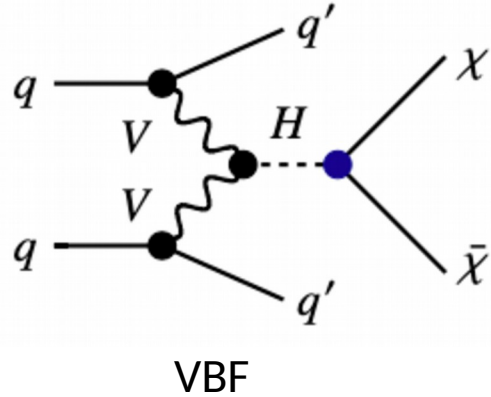
[JHEP 06 (2021) 145]

Keine signifikante Abweichung von SM-Erwartungen beobachtet.



Zerfälle des Higgs-Bosons in nicht detektierbare Teilchen ($H \rightarrow \text{invisible}$)

[ATLAS-CONF-2020-008, PDG]

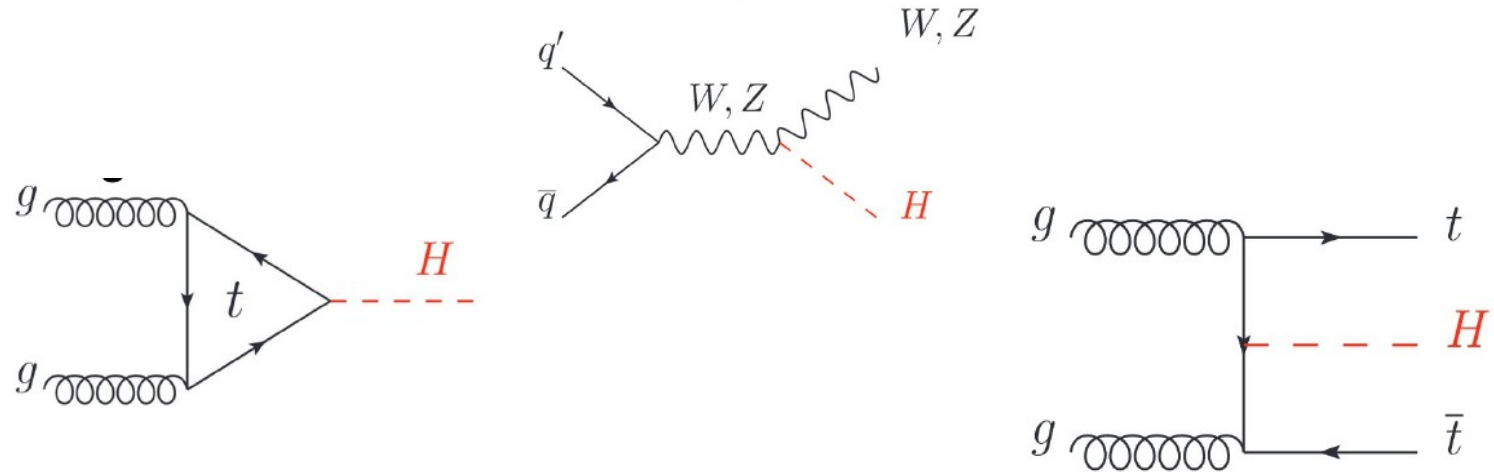


Zerfälle des Higgs-Bosons in nicht detektierbare Zustände in unterschiedlichen BSM-Erweiterungen vorhergesagt – z.B. direkte Zerfälle vom Higgs-Boson in DM-Teilchen.

$H \rightarrow \text{invisible}$ (d.h. in Neutrinos) im SM sehr selten (0.12%).

Unsichtbare Higgs-Zerfälle müssen durch Anwesenheit zusätzlicher Teilchen getaggt werden – z.B. Forward-Jets aus VBF-Higgs-Produktion.

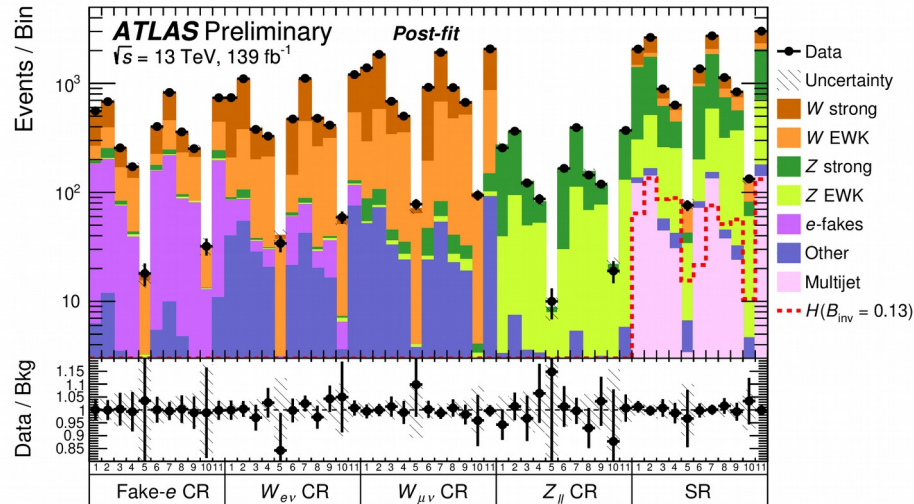
Suche nach $H \rightarrow \text{invisible}$ mittlerweile in allen Produktionsmoden, aber VBF am sensitivsten.



VBF H $\rightarrow$ invisible

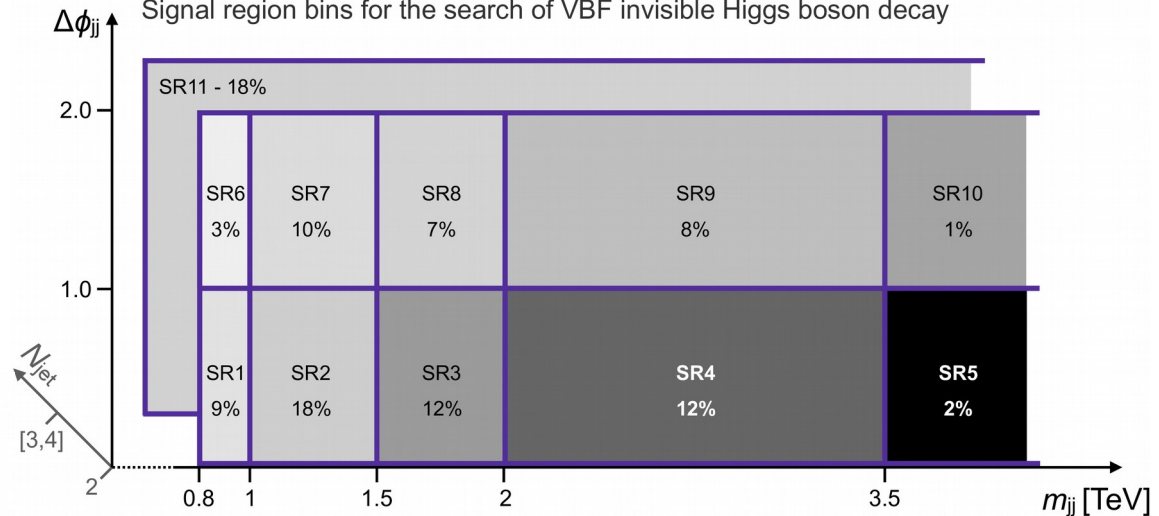
[ATLAS-CONF-2020-008]

- E_T^{miss} – Trigger, hohe E_T^{miss} .
- Zumindest zwei forward Jets in entgegengesetzten Hemispheren mit nur kleinem Winkel in transversaler Ebene ($\rightarrow$ Unterdrückung Multi-Jet Untergrund).
- Hohe invariante Masse des Di-Jet-Systems.
- Unterschiedliche Signalregionen in Jet Multiplizität, m_{jj} und $\Delta\phi_{jj}$



ATLAS Preliminary, 139 fb $^{-1}$

Signal region bins for the search of VBF invisible Higgs boson decay

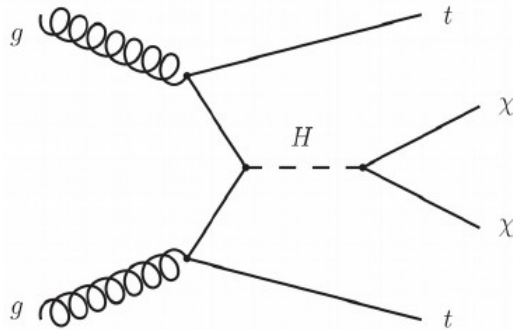
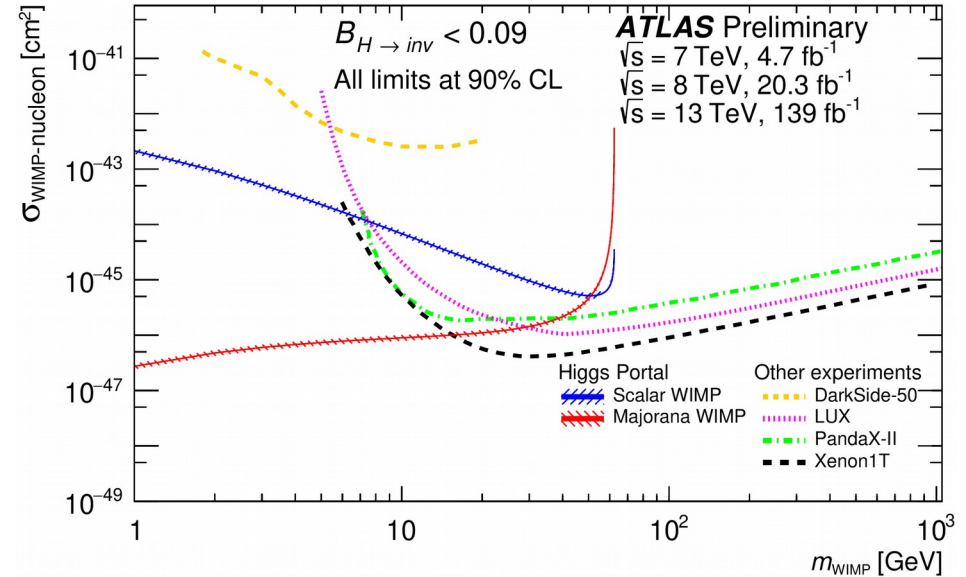
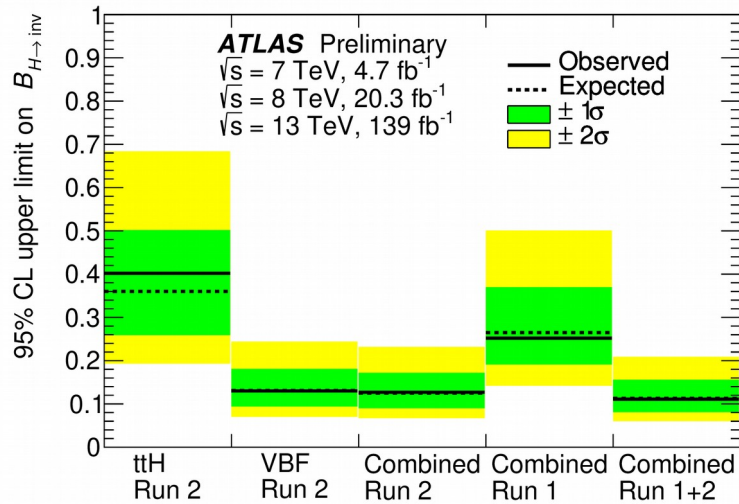


- Hauptuntergründe V+Jets – datengestützt abgeschätzt durch Kontrollregionen.
- Simultaner Fit aller Regionen, beobachtete Datenereignisse in guter Übereinstimmung mit Untergrunderwartung.

$\rightarrow \text{BR}(H \rightarrow \text{inv}) < 13 \% \text{ @ } 95 \% \text{ CL}$

Kombination $H \rightarrow \text{invisible}$

[ATLAS-CONF-2020-052]



Kombination von VBF $H \rightarrow \text{invisible}$, Reinterpretation con Stop-Suchen und Run-1 Ergebnissen

→ $\text{BR}(H \rightarrow \text{invisible}) < 11 \% @ 95 \% \text{ CL}$

Komplementär zu direkten DM-Experimenten.

Higgs-Selbstwechselwirkung

Higgs-Selbstwechselwirkung gibt Auskunft über die Form des Higgs-Potentials (EFT-Ansatz):

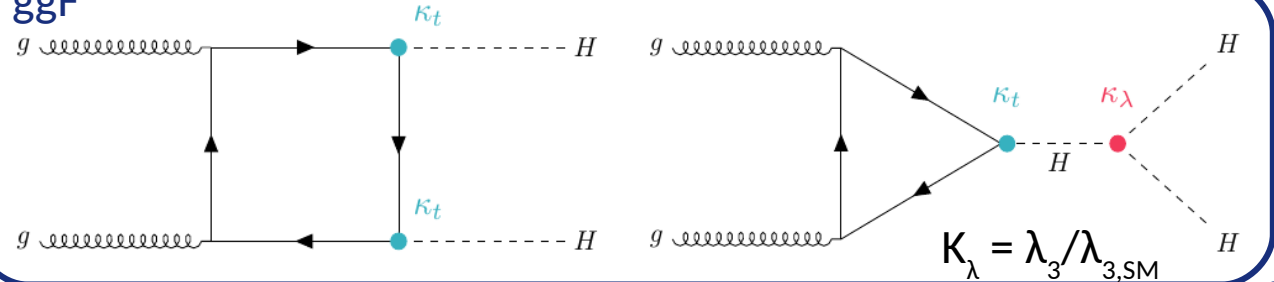
$$V(H) = \frac{1}{2}m_H^2 H^2 + \lambda_3 \nu H^3 + \frac{1}{4}\lambda_4 \nu H^4 + O(H^5)$$

λ_3 kann in ggF-Prozessen gemessen werden, aber wegen destruktiver Interferenz der beiden Diagramme nur kleiner Wirkungsquerschnitt von 31.05 fb bei 13 TeV im SM.

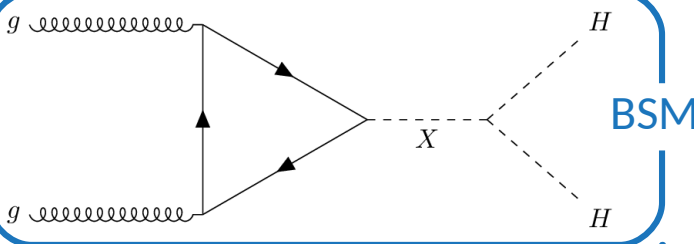
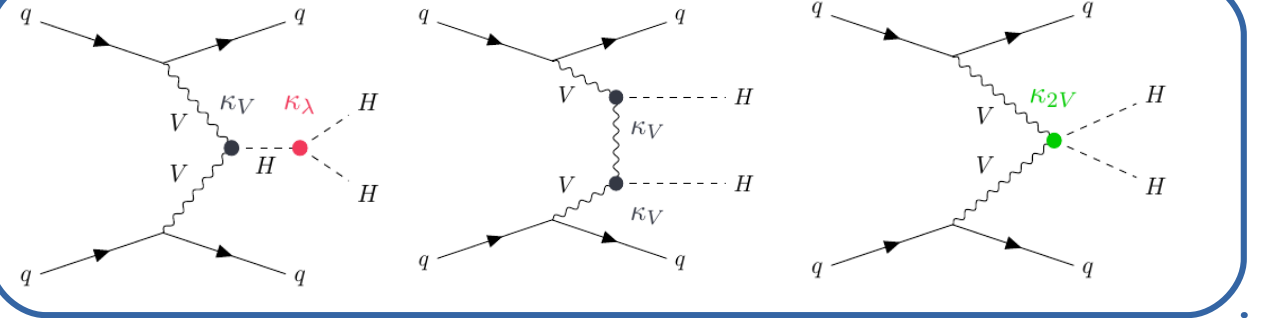
VBF-Produktion weniger sensitiv zu λ_3 , aber sensitiv zu κ_{2V} .

Der Wirkungsquerschnitt kann in BSM-Szenarien signifikant erhöht sein.

ggF



VBF



Suchstrategien

[L. Sanchez]

	bb	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$
bb	33%				
WW	25%	4.6%			
$\tau\tau$	7.4%	2.5%	0.39%		
ZZ	3.1%	1.2%	0.34%	0.076%	
$\gamma\gamma$	0.26%	0.10%	0.029%	0.013%	0.0005%

Identifikation mittels Zerfallsprodukte vom Higgs-Boson

→ Endzustände mit $b\bar{b}$ besonders hohes Verzweungsverhältnis.

→ Zerfälle nach $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ jedoch besonders hoher hadronischer Untergrund, daher vorteilhaft, wenn das eine der beide Higgs-Bosonen in eine leicht zu identifizierende Signatur zerfällt.

→ $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ wegen guter Separation vom Untergrund besonders sensitiv.

Auch andere Signaturen zusammen mit $b\bar{b}$ analysiert – Kombination aller Kanäle.

HH $\rightarrow$ b $\bar{b}$ yy

[JHEP 03 (2021) 257]

$\rightarrow$ sensitivster Kanal, ggF und VBF-Produktion.

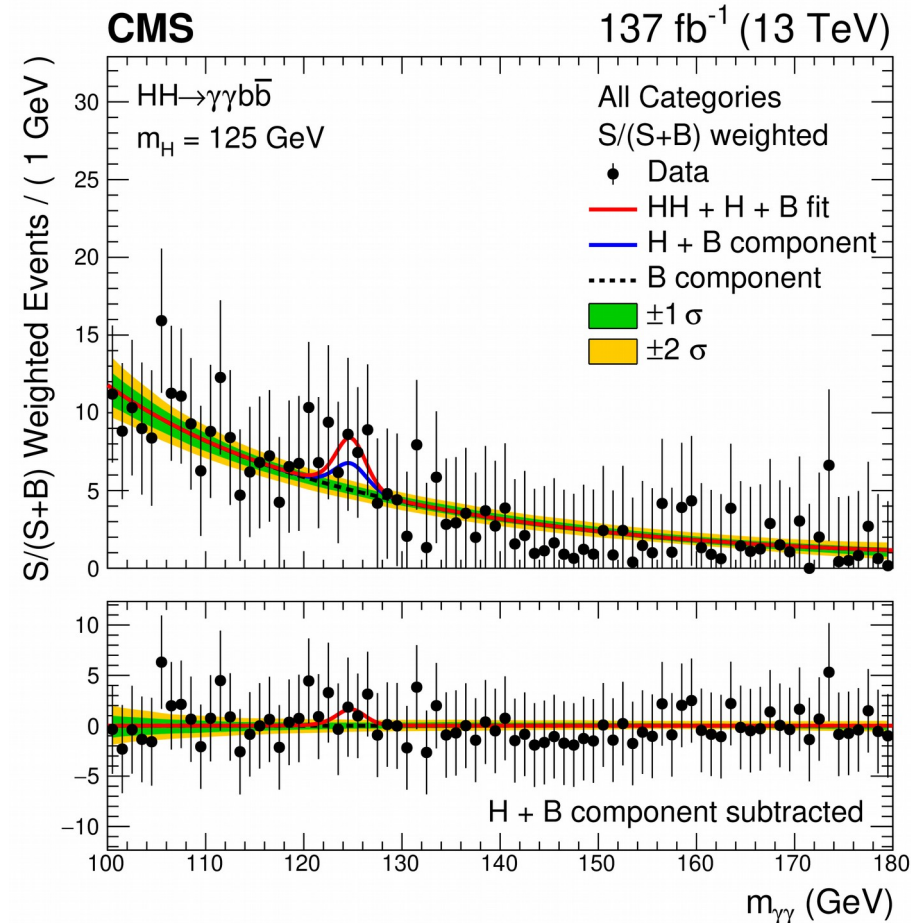
Ereignisselektion via unterschiedlichen MVAs unter Verwendung von verschiedenen HH Signalhypothesen und der Masse des Higgs-Boson-Paar-Systems:

$$\tilde{M}_X = m_{\gamma\gamma jj} - (m_{jj} - m_H) - (m_{\gamma\gamma} - m_H)$$

Untergründe:

- **Nicht-resonant:** γ +Jets und $\gamma\gamma$ +Jets – Bestimmung via datengestützter Methode unter Verwendung der Seitenbänder in den invarianten Massen.
- **Resonant:** $t\bar{t}H$, Unterdrückung durch eigens trainierten Klassifizier.

Bestimmung des HH-Signals mittels simultanen Fits in allen Kategorien in der $(m_{\gamma\gamma}, m_{jj})$ -Ebene.

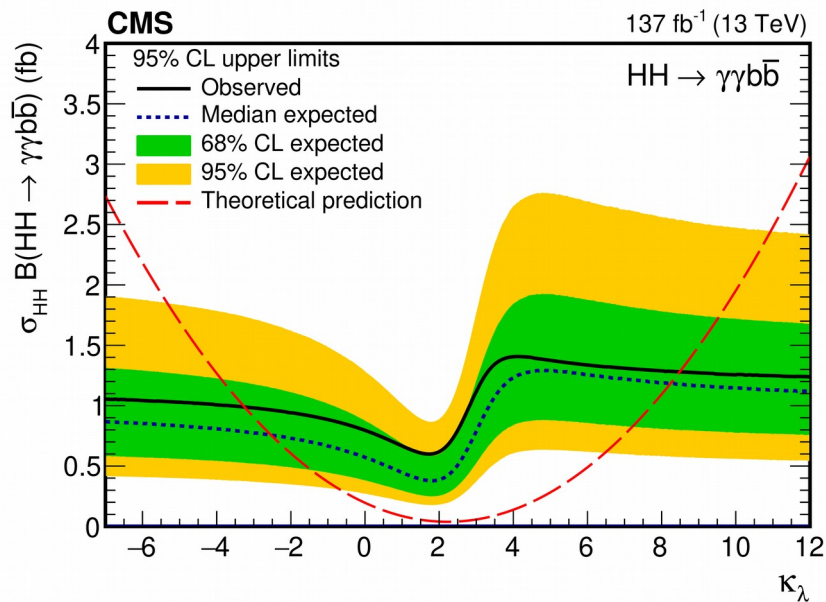


HH $\rightarrow$ b $\bar{b}$ yy

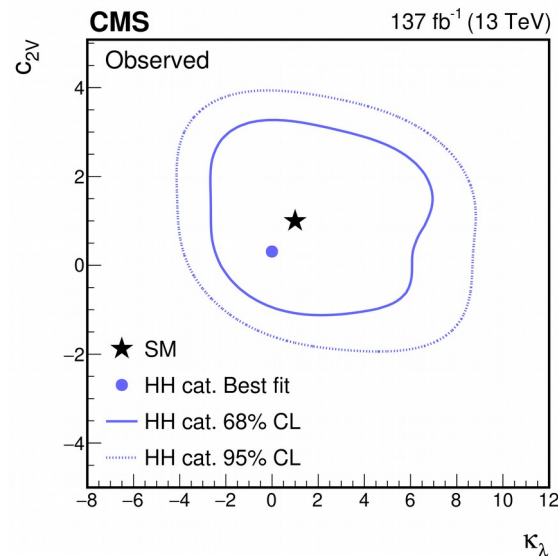
[JHEP 03 (2021) 257]

- Die Suche ist noch limitiert durch die Statistik.
- Ergebnisse kompatibel mit SM:

$$\sigma_{ggF+VBF}^{HH} < 7.7 \text{ (5.2)} \times \sigma_{ggF+VBF}^{HH \text{ SM}}$$
$$-3.3 \text{ (-2.5)} < \kappa_\lambda < 8.5 \text{ (8.2)}$$



Unterschiedliche BSM-Interpretationen untersucht.

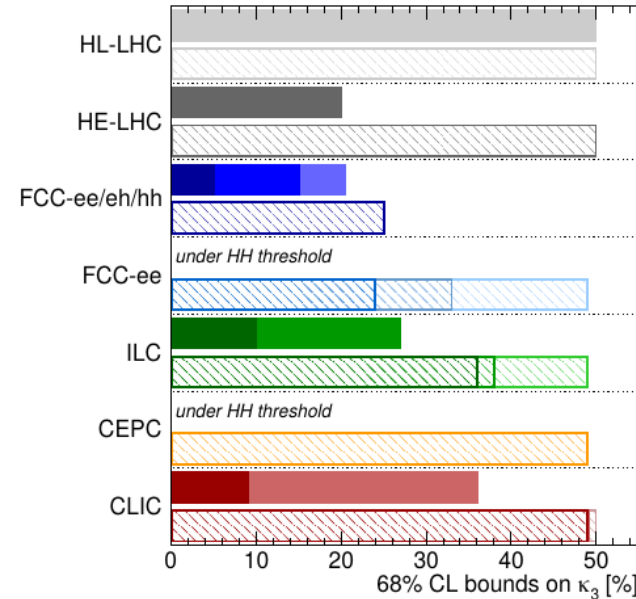
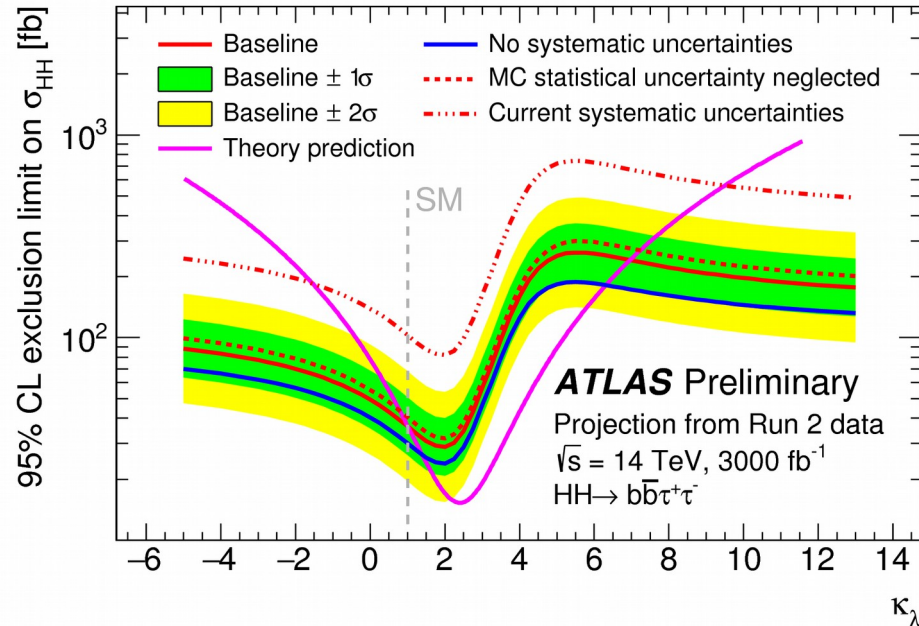


Perspektiven in Bezug auf die Higgs-Selbstkopplung

[arXiv:1910.11775 [hep-ex], ATL-PHYS-PUB-2018-053]

HL-LHC: signifikanter Statistikzuwachs und mögliche Methodenverbesserung.

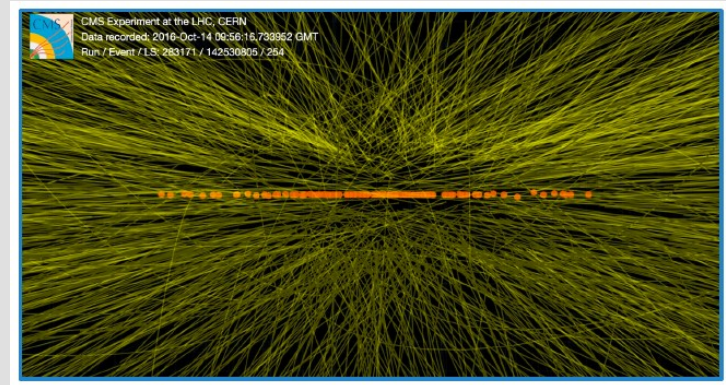
→ Hinweis auf die SM-Higgs-Selbstwechselwirkung mit 4σ möglich? (Kombination von $b\bar{b}\gamma\gamma$ und $b\bar{b}\tau\tau$ Kanälen) – entspräche einer Genauigkeit von 50% auf κ_λ . (ATLAS-Prognose hält hier 40% für möglich.)



Higgs@FC WG September 2019

di-Higgs	single-Higgs
HL-LHC 50%	HL-LHC 50%
HE-LHC 10-20%	HE-LHC 50%
FCC-ee/eh/hh 5%	FCC-ee/eh/hh 25%
LE-FCC 15%	LE-FCC n.a.
FCC-eh 17-24%	FCC-eh n.a.
	FCC-ee ³⁶⁵ 24%
	FCC-ee ³⁶⁵ 33%
	FCC-ee ²⁴⁰ 49%
ILC ¹⁰⁰⁰ 10%	ILC ¹⁰⁰⁰ 36%
ILC ⁵⁰⁰ 27%	ILC ⁵⁰⁰ 38%
	ILC ²⁵⁰ 49%
	CEPC 49%
CLIC ³⁰⁰⁰ -7%+11%	CLIC ³⁰⁰⁰ 49%
CLIC ¹⁵⁰⁰ 36%	CLIC ¹⁵⁰⁰ 49%
	CLIC ⁵⁰⁰ 49%
	CLIC ²⁴⁰ 50%

All future colliders combined with HL-LHC



HL-LHC und zukünftige Herausforderungen/Technologien



- **Erwartete Statistik:** 3000 fb^{-1} (oder sogar 4000 fb^{-1}) $\rightarrow$ 20 mal mehr Daten als aktuell vorhanden.

Gut für Präzisionsmessungen und bislang nicht adressierte Signaturen. Der Sensitivitätszuwachs bei vielen BSM-Suchen wird aber langsamer als aktuell erfolgen (da eventuell keine Steigerung in der Schwerpunktsenergie)

- **Physik am HL-LHC:**

Higgs-

Kopplungen:

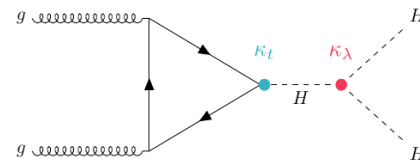
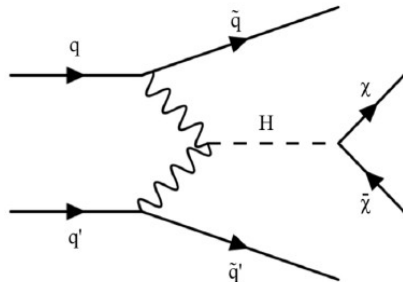
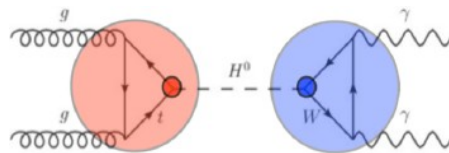
Ziel 2-4%

Genauigkeit für
die meisten SM-
Zerfallsmoden

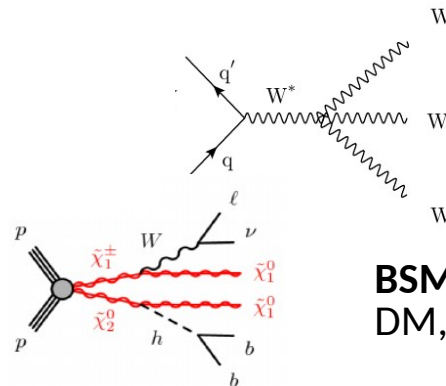
$H \rightarrow \text{invisible}$:

Für VBF:

$\text{BR} < 3.8 \%$



**Higgs-
Selbstwechselwirkung**
- Hinweis 4σ



**Multi-Boson-
Präzisionsmessungen**

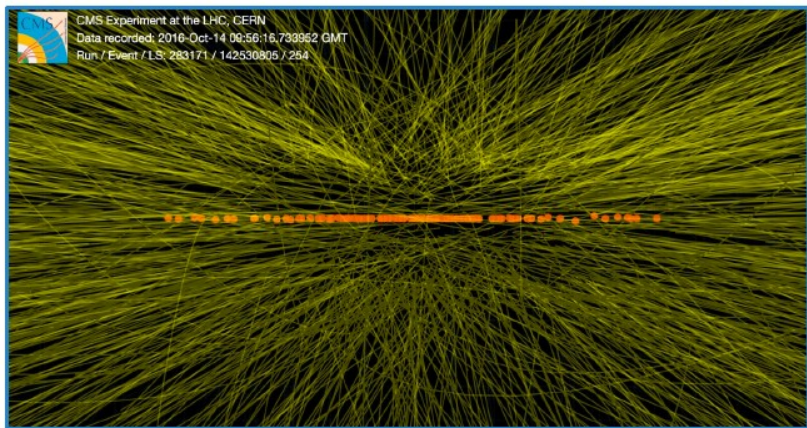
BSM-Suchen:

DM, SUSY, langlebige Teilchen...

...und Herausforderungen

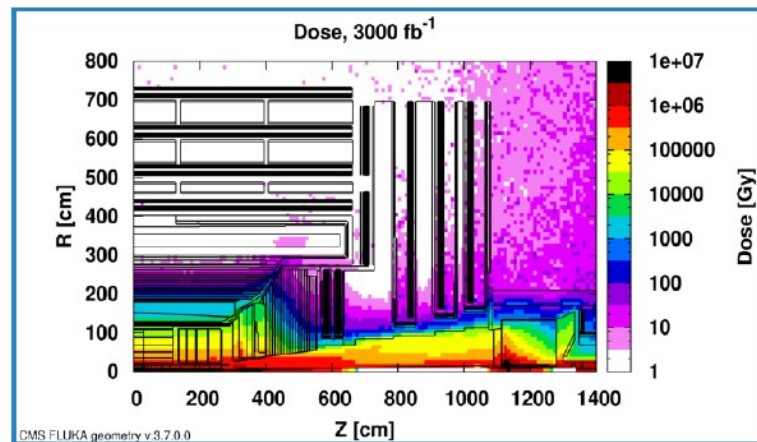
Die hohe int. Luminosität kommt mit einem Preis:
hohes Pileup – $\mu = 200$ bei 25ns bunch crossing Rate

→ Pileup:



- Detektor-Upgrades – höhere Granularität wo möglich, oder Verbesserungen im Timing.
- Signifikante Updates/Neu-Design vom Trigger.
- Auch auf Rekonstruktions- und Analyselevel verbesserte Methodik zur Pileup-Unterdrückung (z.B. Graph Neural Networks)

→ Strahlung:



- Strahlungsschäden bzw. die akkumulierte Dosis kann zu schlechterer Performance führen.
- Ersatz der Tracker- und Kalorimeter-Systeme.
- Elektronik-Update.

Beispiel für eine ‚emerging technology‘: Quantencomputing

Problem beim HL-LHC: große Datenmengen, hohe Komplexität
→ auch Fortschritte im Computing notwendig.

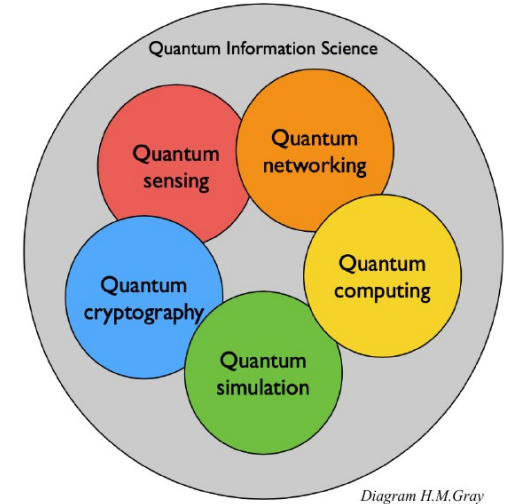
Eine ‘emerging technology’ (die zugegebenermaßen aktuell noch sehr spekulativ ist), die helfen kann:

Quantum information science

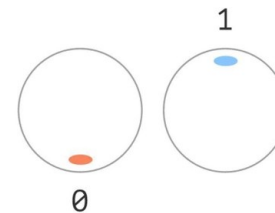
Z.B. Quantencomputing:

- Im Gegensatz zu einem klassischen Computer ist ein Quantencomputer nicht deterministisch
→ Qubits (in $\mathbb{C}^2$: $a|0\rangle + b|1\rangle$) anstelle von Bits (nur 0 oder 1).
→ Informationen können ‘dichter’ gespeichert werden.
→ Komplexere Berechnungen (theoretisch) möglich.
→ *Nachteil*: das Ergebnis der Berechnungen ist auch probabilistisch.

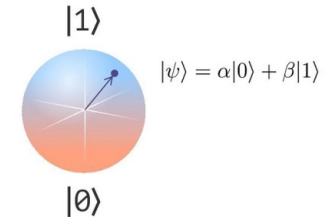
Aktuell sind Quantencomputer klassischen Computern noch wesentlich unterlegen, aber schnelle Entwicklungen.



Bit



Qubit



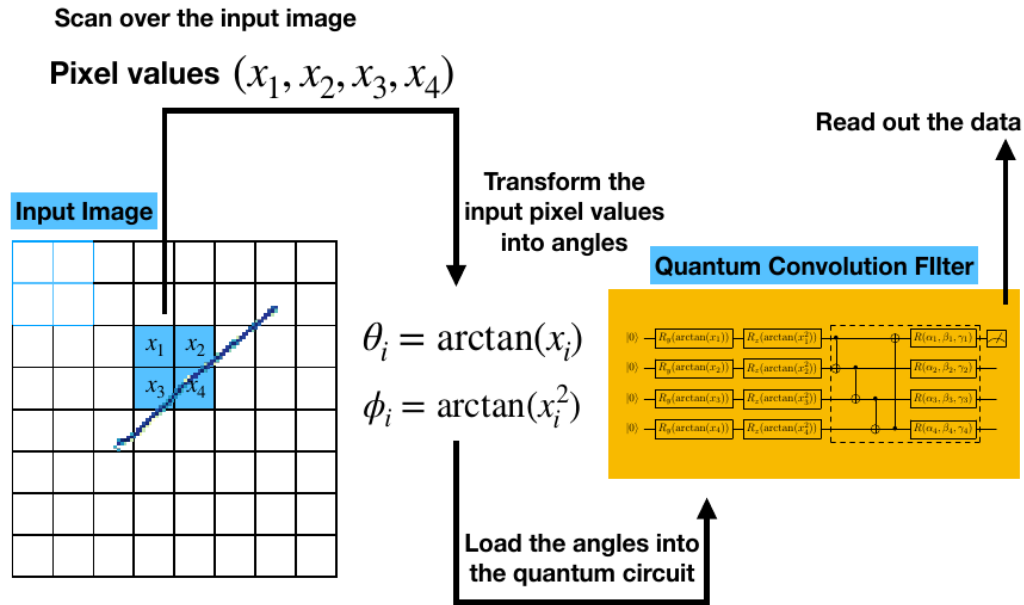
[Hari Krishnan]

In der Teilchenphysik verschiedene Anwendungen denkbar:

- **Kombinatorische Probleme** → Pattern recognition, Tracking, Vertexing, Jet clustering,...
- **Simulation von quantenmechanischen Systemen** → Monte Carlo Simulation
- **Machine Learning** → Lösung komplexerer Probleme durch Quantum Machine Learning.

Beispiel:

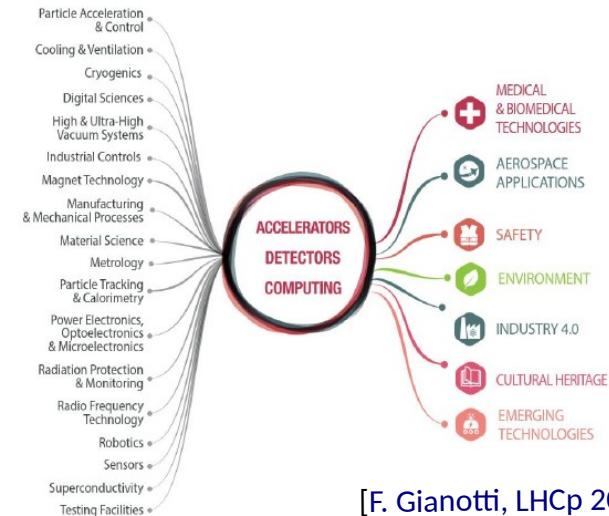
Quantum Convolutional Neural Networks (QCNN)



- Convolutional Neural Networks CNN in der Bilderkennung weit verbreitet.
- Funktionsweise QCNN wie klassisches CNN: Ersetzen einer klassischen convolutional layer durch eine quantum layer.
- Vorteil: die quantum layer ist möglicherweise in der Lage Information etwas 'kompakter' zu verarbeiten, d.h. es sind weniger Trainingsiterationen nötig
→ Vorteilhaft in sehr komplexen Situationen, oder falls nur wenig Trainingsdaten zur Verfügung stehen.
- **Aber:** aktuell nur theoretische Erwartung.

Zusammenfassung

- Physikprogramm am LHC sehr erfolgreich und vielseitig.
- Erwartungen wurden vielfach übertroffen – in Bezug auf Präzisionsmessungen.
- Jedoch noch keine BSM-Physik gefunden – sehr bemerkenswerte Ausschlußgrenzen.
- Viele sehr vielversprechende zukünftige Richtungen, aber kein klarer Weg vorwärts.
- Alles möglich: Entdeckung ‘morgen’ oder lange und mühsam.
- Zugleich zeichnet sich eine zunehmende Synergie (und Öffnung des CERNs) mit und für andere Felder ab.



[F. Gianotti, LHCp 2021]

Backup

“The objective of the ECFA Early-Career Researchers (ECR) Panel is for its members to discuss all aspects that contribute in a broad sense to the future of the research field of particle physics.” [Link](#)

Deutsche Delegierten:

- Jeanette Lorenz (Fraunhofer IKS, LMU Munich)
- Alexander Mann (LMU Munich)
- Laura Moreno Valero (Münster)

DESY:

- Jan-Henrik Arling (DESY)
- Younes Otari (DESY)
- (one missing, was Henrik Jansen)



Report on the ECFA Early-Career Researchers Debate on the
2020 European Strategy Update for Particle Physics

The ECFA Early-Career Researchers
February 6, 2020

List of editors/organisers

A. Belhachem, Université catholique de Louvain, Chémica du Cyclotron 2, Louvain-la-Neuve, Belgium
E. Brondolo, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland
A. A. Elze, Queen Mary University of London, Mile End Road, London, United Kingdom
J. García Pardiñas, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, Zürich, Switzerland
C. Gille, Bergische Universität Wuppertal, Gausstrasse 20, Wuppertal, Germany
L. Guichenot, CERN, Geneva 23, Geneva, Switzerland
E. Guerin, LIP, Campus de Gualther, Braga, Portugal
E. Guerin, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Châton, Lausanne, Switzerland
N. Harnois-Frenay, Lund University (University of Lund), Sölvegatan 14A, Lund, Sweden
A. Jais, Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, LNCa, Orsay, France
H. Jansen, DESY, Notkestr. 85, Hamburg, Germany
R. H. M. Maier, Lund University, Föreläsargatan 1, Lund, Sweden
E. Marenco, INFN Sezione di Perugia, Via A. Pascoli, Perugia, Italy
A. Marth, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, Zürich, Switzerland
J. McPeck, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland
M. Quirke, Maitland, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland
J. Rindler, CNRS/IN2P3, Institut Polytechnique de Paris, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France
E. T. J. Ross, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, United Kingdom
R. Schöfbeck, HEPHY, Nuklearer Institut, Forschungstrasse 111, Villigen PSI, Switzerland
S. Schöfbeck, National Centre for Nuclear Research (NCB), ul. Pasteura 7, Warsaw, Poland
F. Stauder, National Centre for Nuclear Research (NCB), ul. Pasteura 7, Warsaw, Poland
S. L. Williams, University of Cambridge, JJ Thomson Avenue, Cambridge, United Kingdom
D. Zanzi, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland

List of authors

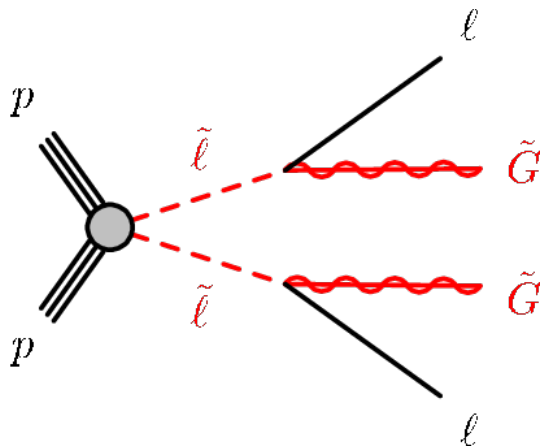
N. Andari, CEA Saclay, France
L. Apalduño, LIP, Avenida Prof. Gama Pinto 2, Lisbon, Portugal
R. Aspin, Czech Technical University in Prague, Břichová 7, Prague, Czech Republic
E. Baker, Institute of Physics, Clarendon Road, Oxford, Oxford, United Kingdom
I. Belhachem, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland
L. Belhachem, The University of Oxford, Keble Road, Oxford, United Kingdom
A. Belhachem, Université catholique de Louvain, Chémica du Cyclotron 2, Louvain-la-Neuve, Belgium
J. Beyer, DESY Hamburg, Notkestr. 85, Hamburg, Germany
L. Brondolo, INFN Sezione di Pisa, Edificio C - P.le dei Fisici 1, Pisa, Italy
C. Buerli, Lund University, Sölvegatan 14A, Lund, Sweden
R. Ellis, UCL/HEP, Boulevard du Triomphe, Brussels, Belgium
R. L. Fries, University of Oslo, Sem Sæviens vei 23, Oslo, Norway
E. Böh, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, Brussels, Belgium
F. A. G. G. Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics, Av. Gama Pinto, Lisbon, Portugal
L. Guichenot, DESY - Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestrasse 85, Hamburg, Germany
E. Brondolo, CERN, Esplanade des Particules 1, Geneva, Switzerland
F. Gille, Centre de Recherches Nucléaires, Avenue de la Recherche 1, Strasbourg, France
R. Gille, Institut de Física d'Altes Energies, Campus UAB, Bellaterra (Barcelona), Spain
I. Grosse, Birkbeck National Institute for Research in Physics and Nuclear Engineering, Rostrușeni 30, Bucharest-MG, Romania
L. N. C. Jansen, Birkbeck National Institute for Research in Physics and Nuclear Engineering (IPNS-HE), Rostrușeni 30, Bucharest-MG, Romania

Report on the ECFA Early-Career Researchers Debate on the 2020 European Strategy Update for Particle Physics

-
arXiv:2002.02837
[hep-ex]

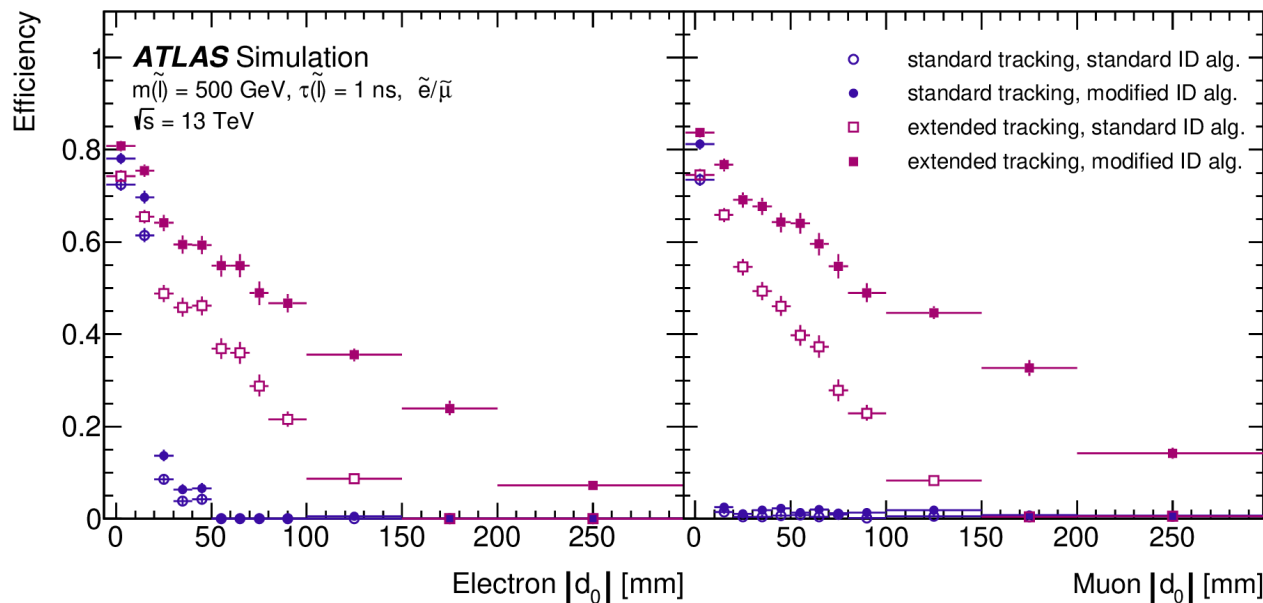
Gestaltungsmöglichkeiten auch über die
Young High Energy Physicists Association
<https://yhep.desy.de/>

**Weitere Suchen nach langlebigen
Teilchen**



Durch Veränderungen der Identifikations- und Rekonstruktionsalgorithmen (insbesondere Kriterien in Bezug auf den transversen Impaktparameter) sensitiv zu solchen Prozessen.

Langlebige Teilchen auch in SUSY-Modellen mit Gravitinos
→ koppelt nur via Gravitation

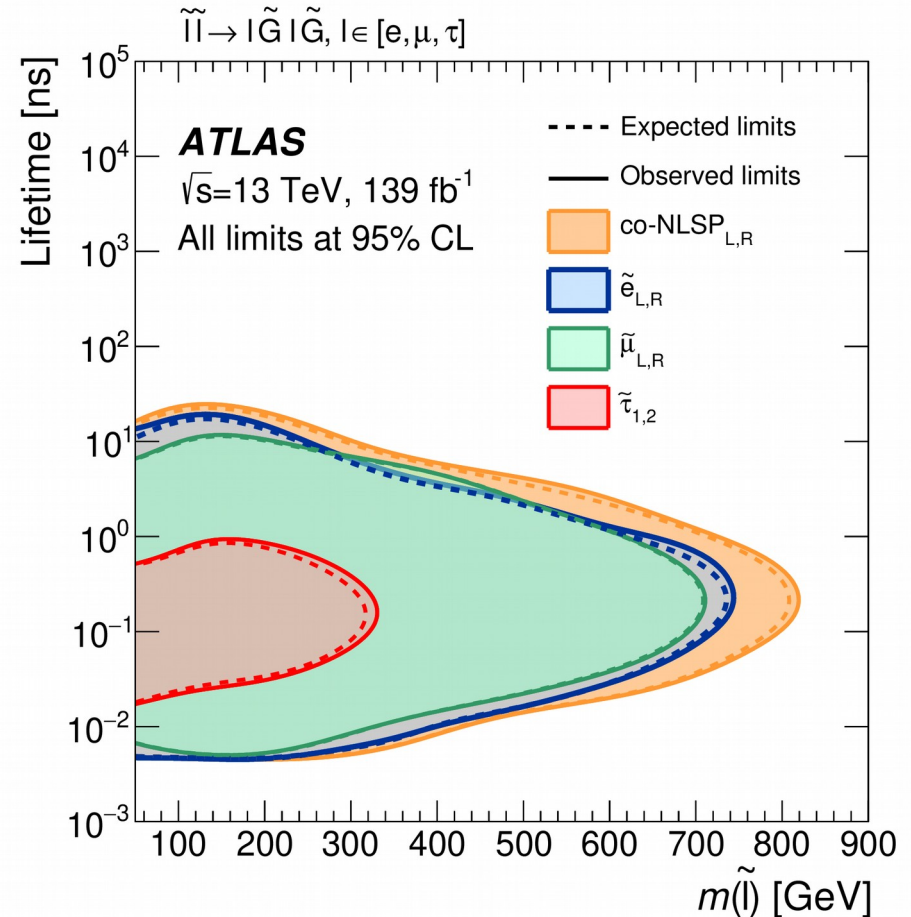


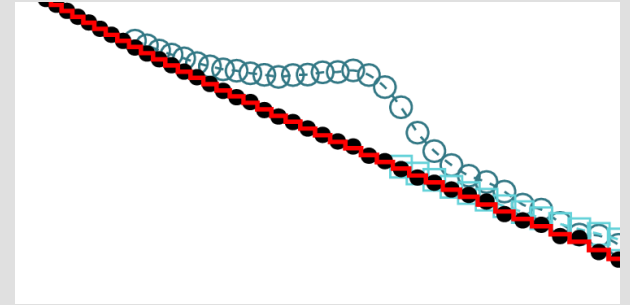
- Signalregionen mit zwei Leptonen (Elektron oder Myon).
- Veto von kosmischen Myonen, andere Untergründe von fehlidentifizierten Elektronen oder Myonen.

Kein Ereignis in den Signalregionen beobachtet.

→ Ausschlussgrenzen auf die Typen vom nächstleichtesten LSP platziert, oder auch - Mischung berücksichtigt.

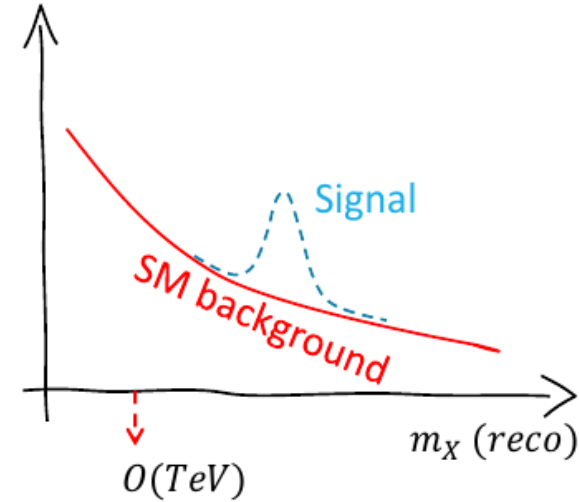
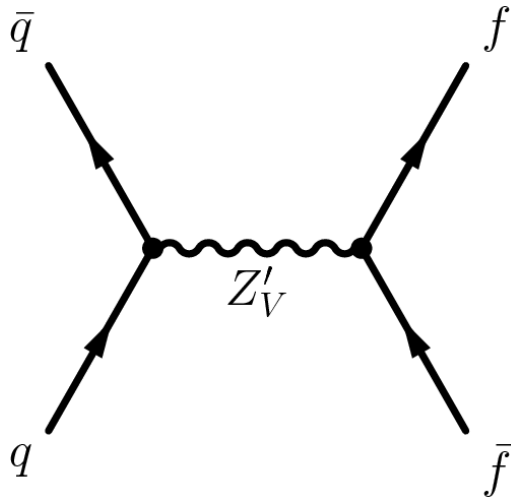
LEP-Ausschlußgrenzen ($\sim 60 - 90$ GeV) signifikant überschritten.





Suchen nach (schweren) Resonanzen

Suche nach Resonanzen



[Claudio Quaranta]

Resonanzen in vielen BSM-Theorien vorhergesagt:

- GUT, Compositness-Modelle, Extradimensionen, aber auch in SUSY.
- In Zerfällen von einem Mediatorteilchen zwischen SM und DM.

Vorteil: Masse lässt sich (genau) aus Zerfallsprodukten rekonstruieren, klare Separierung vom Untergrund.

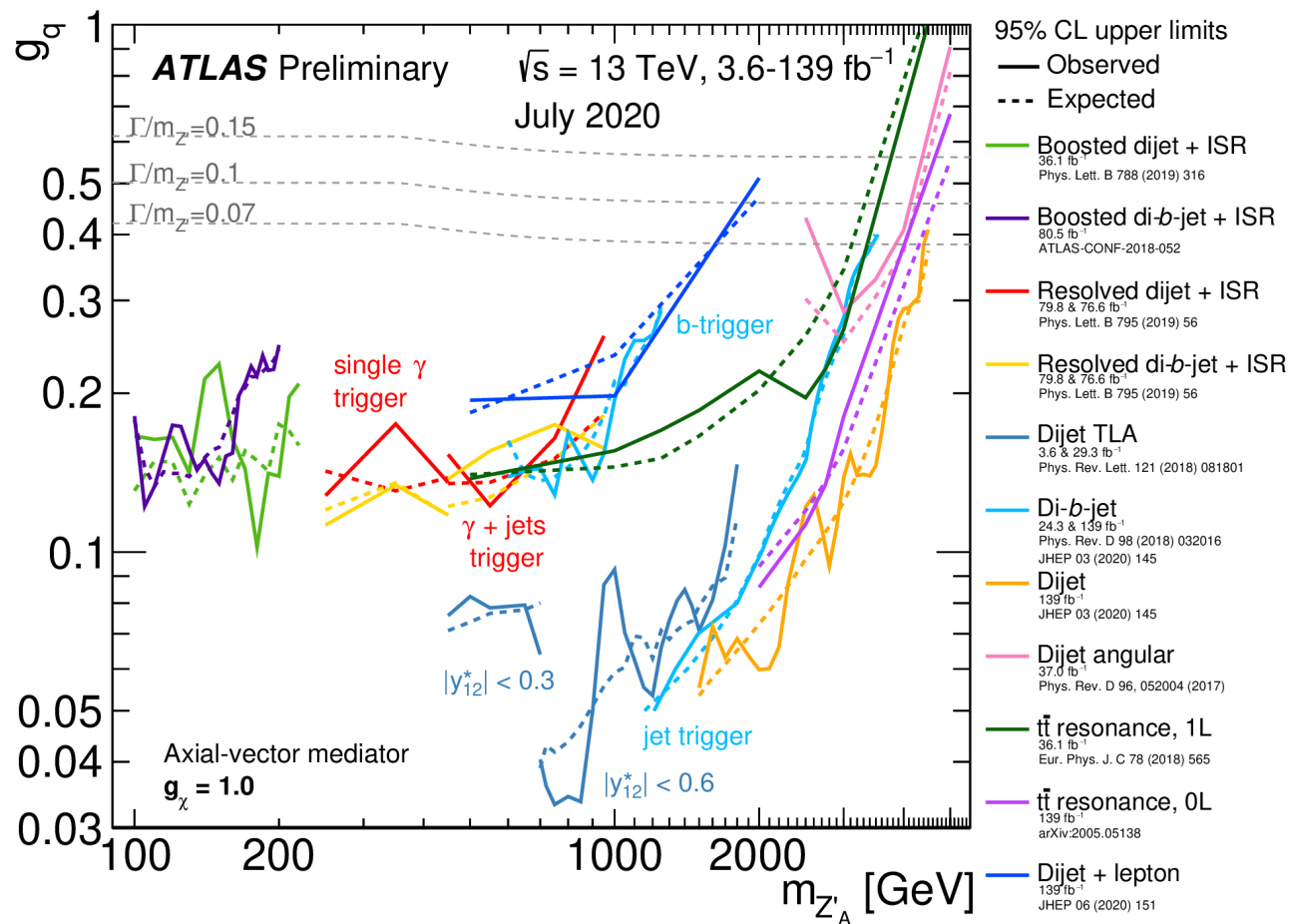
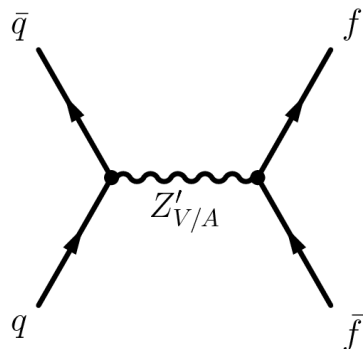
Überblick

[Summary plots]

→ Suche nach Resonanzen in vielfältigen Endzuständen:

- $X \rightarrow \text{Jet Jet}$
- $X \rightarrow \text{Lepton Lepton}$
- $X \rightarrow t\bar{t}$
- Aber auch: $X \rightarrow \text{Lepton Neutrino}$ oder $X \rightarrow \text{Di-Boson } (\gamma, W, Z, H)$ mit weiteren Zerfällen.

Z.B. Einschränkungen auf Axial-Vektor-Mediator in DM-Modellen.



Di-jet Resonanzsuchen

[JHEP 03 (2020) 145]

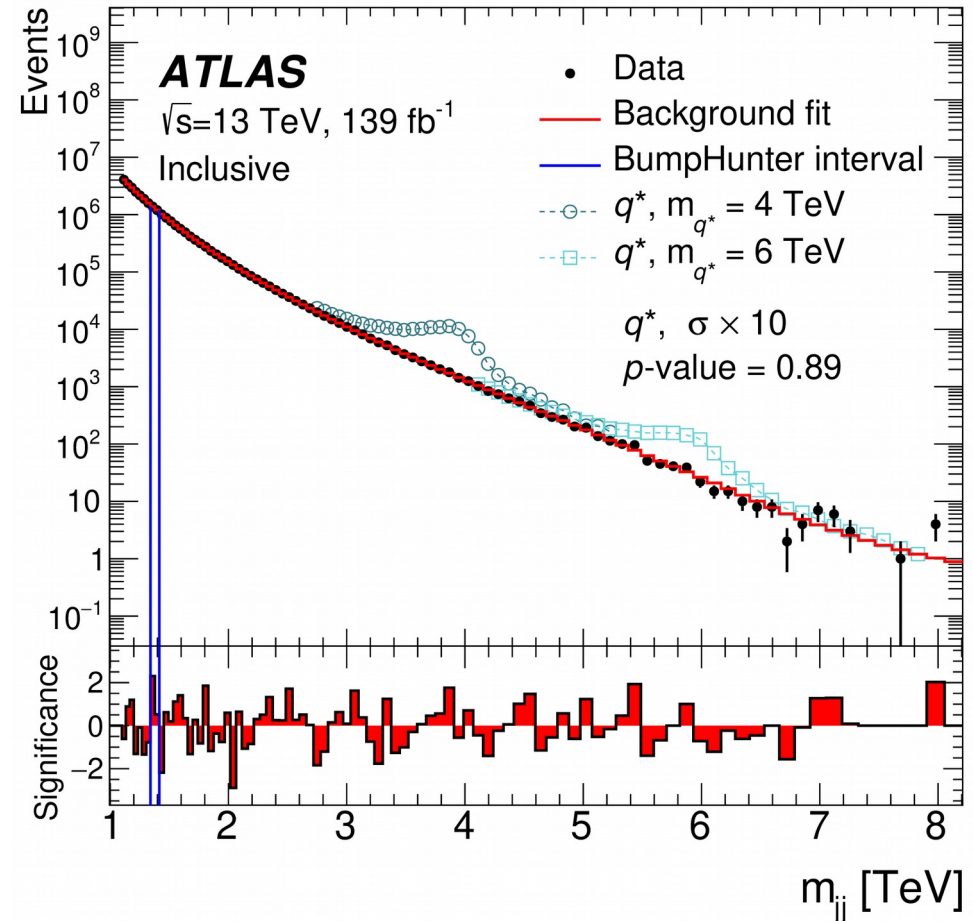
Di-Jet-Prozesse im SM hauptsächlich durch QCD-Prozesse produziert
→ kontinuierlicher Untergrund

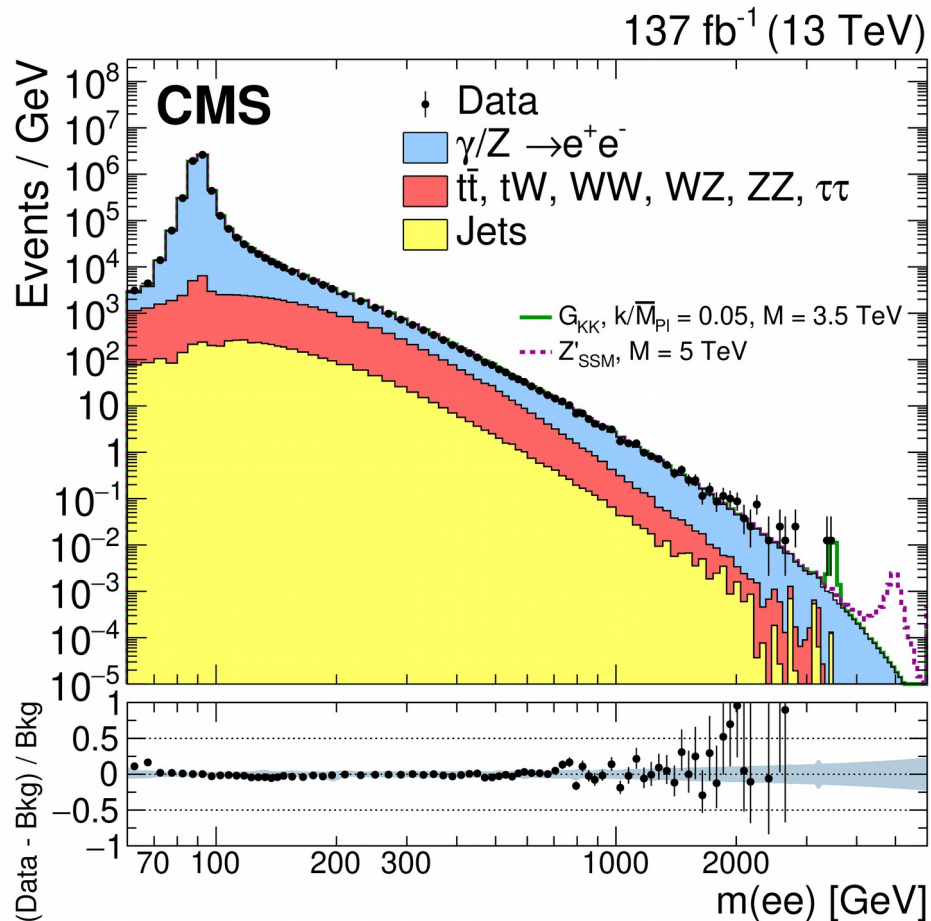
Neues Teilchen würde als Resonanz im m_{jj} -Spektrum erscheinen, z.B. von angeregten Quark q^ in Compositeness-Modellen, oder schweren W' oder Z' -Bosonen.*

Selektion: Single-Jet Trigger, ≥ 2 Jets with $p_T > 150$ GeV, Winkel und Rapiditätsdifferenz zwischen Jets.

Untergrund abgeschätzt durch Fit mit der 'sliding-window-Methode', wobei für den Untergrund eine parametrisierte Funktion verwendet wird.

Ausschlusslimits z.B. angeregtes Quark $m(q^*) < 6.7$ TeV, Z' -Boson $m(Z') < 2.7$ TeV @ 95 % CL.





Viele Modelle (GUT, LED, DM, Preonen) sagen resonante oder nicht-resonante Abweichungen im Spektrum der invarianten Masse von einem Leptonpaar voraus.

Selektion von einem hochenergetischen Elektron oder Myonpaar.

Die meisten Untergründe werden mittels Simulation bestimmt. Normierung der Drell-Yan-Untergründe mittels gemessener Ereignisse im Z-Peak.

Suche nach Peak in einem Massefenster um die erwartete Resonanz, mit Hilfe eines unbinned maximum likelihood Fits innerhalb Massefensters.

Keine signifikante Abweichung gefunden, Ausschlusslimits z.B. 5.15 TeV auf Z'_{SSM} -Bosonen.

Unkonventionelle Resonanzsuchen: mono-S

[Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 121802]

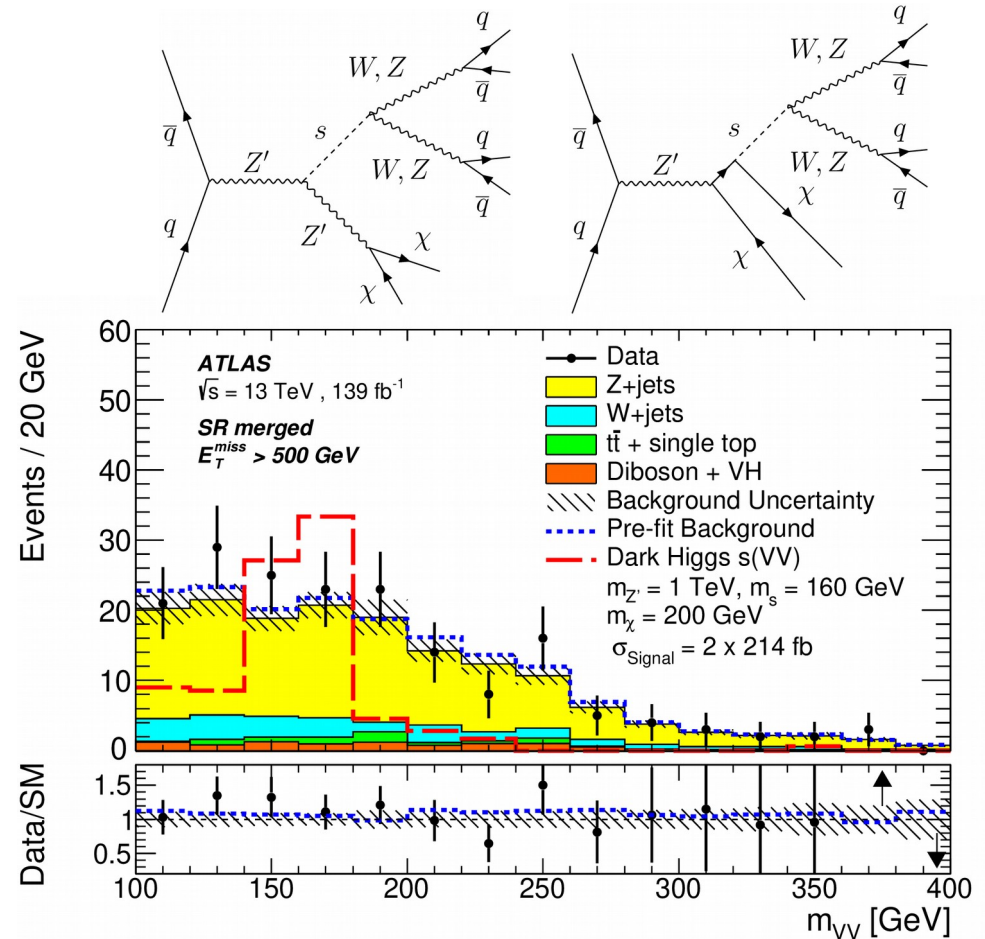
Dark Higgs Modell:

- Zusätzliches Higgs-artiges Boson s .
- Motiviert durch die Notwendigkeit im DM-Sektor Massen zu generieren.
- Dadurch können Forderungen von der Reliktdichte abgeschwächt werden, weil sich für die DM-Teilchen ein Annihilationskanal öffnet.

Unterschiedliche Suchen nach dem Skalar s + E_T^{miss} , je nach Zerfällen:

→ Reinterpretation von mono-H, aber auch Suche nach Zerfällen $s \rightarrow VV$ mit hadronischen oder leptonischen Zerfällen.

Falls s sehr geboostet, Rekonstruktion von Jets mit großen R notwendig.



Reinterpretation

How to maximise usefulness of data and analysis?

Analyses typically focus on a small number of benchmark simplified models, but are typically more general ($\rightarrow$ *other DM searches, leptoquarks, other than the target models*)

New tools/material for re-interpretation of the analyses available!

