Einführung in die Data Acquisition am LHC

(am Beispiel CMS)

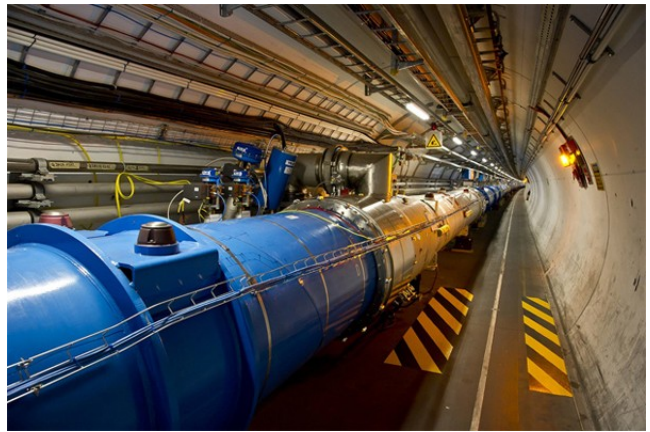
(Christoph Schwick)

Naturbeobachtung: Wenig neues seid 900 Jahren

- Auge
  - 100µm
- Lupe (11. Jahrh.)
  - 7µm (x15 oder besser --)

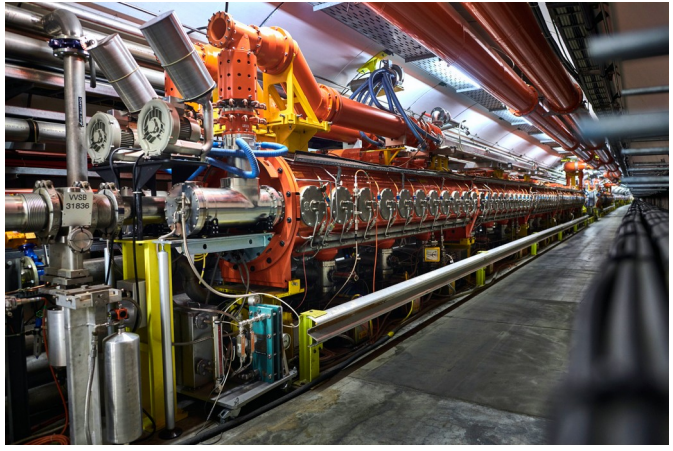
- Mikroskop (~1600)
  - 200nm (x2000; limitiert durch Diffraktion, i.e. optische Wellenlänge)
- Elektronen Mikroskop (1931)
  - De Broglie: $\lambda_B = \frac{c^* h}{p}$ c*h = 1.239841 eV*µm, p~100keV
  - 100pm, Präparation des Objekts benötigt
  - Limitierung Aberrationen der Optik für Elektronen
  - Keine Farben

- Beschleuniger (~1930)
  - Großer Impuls, kleine Wellenlänge
  - 7TeV --> 1.7 x 10^{-19} m (Proton ~ 1 x 10^{-15}m)
  - **Quantenmechanik: Objekte werden bei der „Inspektion“ zerstört**
    - Einstein: $E = mc^2$, Quantenfeldtheorie



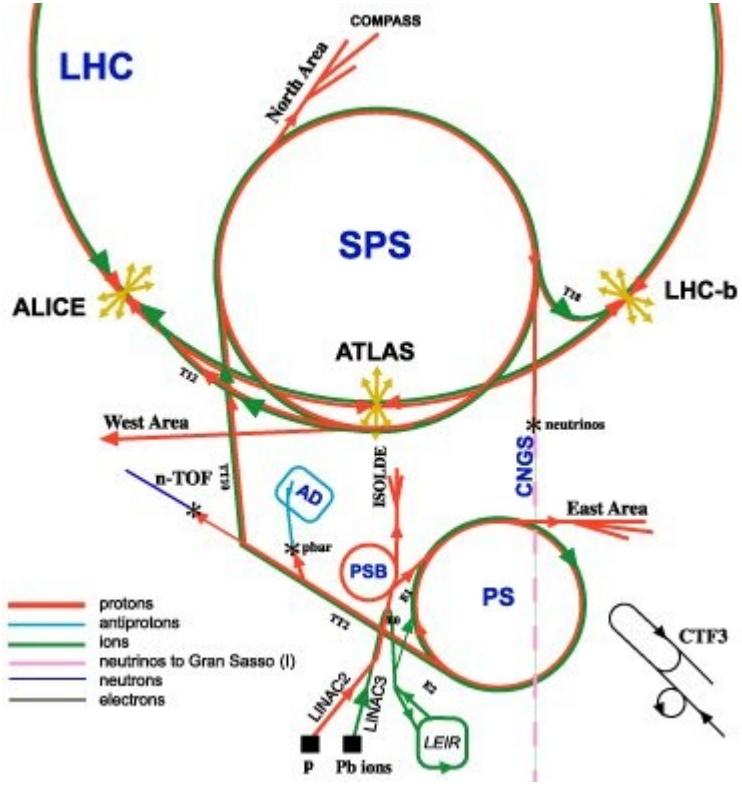
Der Beschleuniger

- Eine Kette von Beschleunigern bringt die Teilchen auf Trab
  - Historische Gruende (die alten Beschleuniger werden mitbenutzt beim Beschleuningen)
  - Praktische Gruende
    - Ein Strahl mit langsamen Teilchen ist “gross” und braucht ein grosses Strahlrohr.
    - Die Magnete des LHC kann man nicht fuer “dicke” Strahlen bauen (Aperture technical limit)



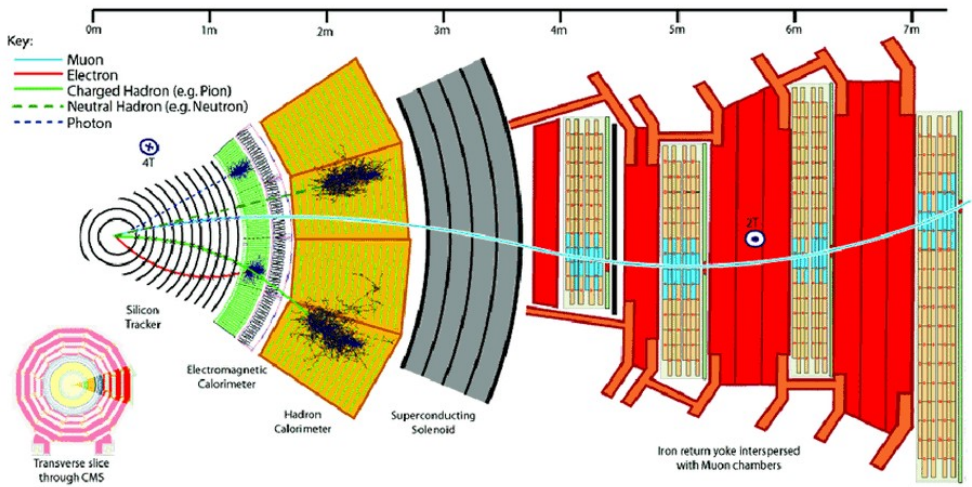
Beschleunigung mit “Cavities”:

Strahl is in Pakete (bunches) unterteilt

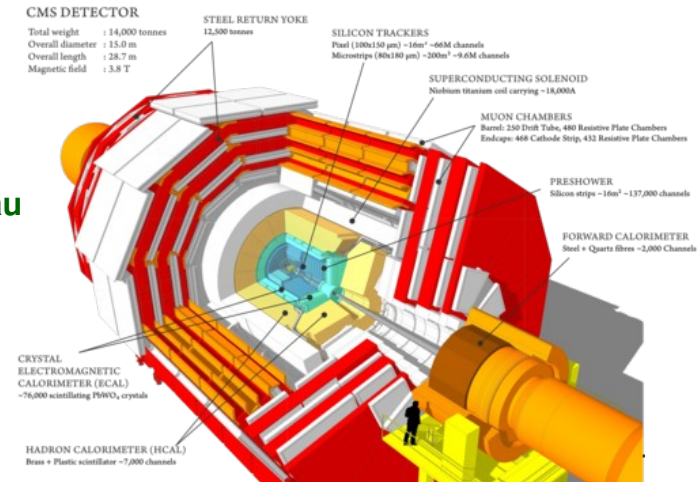


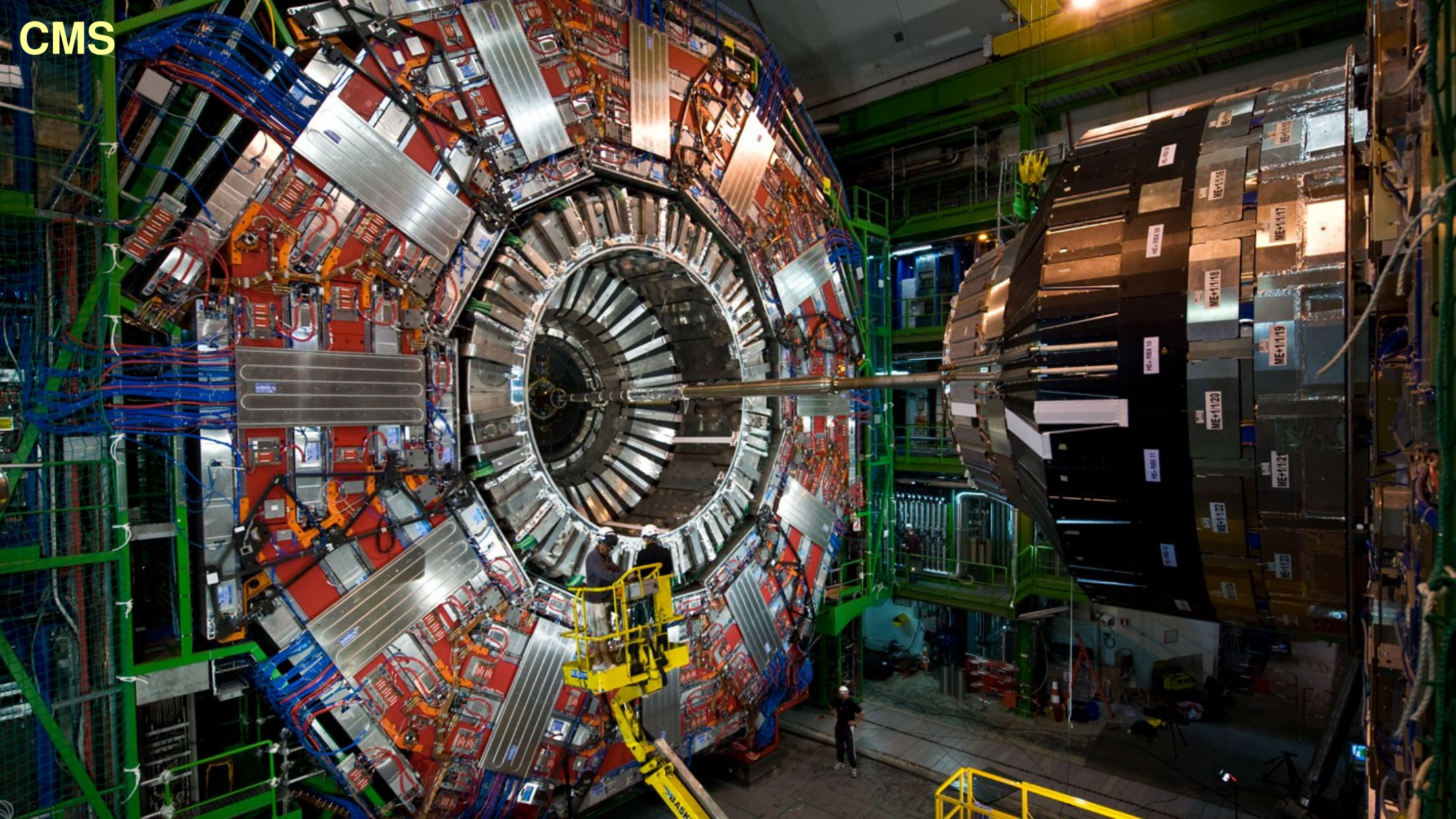
Experimente: Nachweis von Teilchen

- **Wunsch:** Teilchenart, Impuls, Energie, Spur, Ladung
- Position und Impuls:
  - Geladene Teilchen “ionisierten” Materie (z.B. Halbleitern, Gase)
    - Elektrische Impulse nachweisbar in **Silizium Detektoren**
    - **3D Photo** der Ereignisse
      - 130 Millionen Pixel und 9 Millionen “Strips”
    - Magnetfeld erlaubt **Impulsmessung** (“Rechte Hand Regel”)
- Energie Messung: Kalorimeter
  - Elektronen und Photonen:
    - Wechselwirkung mit Atomhüllen → Schauer
    - Lichtblitz proportional zur Teilchenenergie
  - Stark wechselwirkende Teilchen (Hadronen : p,n,π,...)
    - Wechselwirkung mit Atomkernen → Schauer
    - Lichtblitz proportional zur Energie
- Myonen Nachweis in äußeren Spurenkammern



Zwiebel - Aufbau




CMS

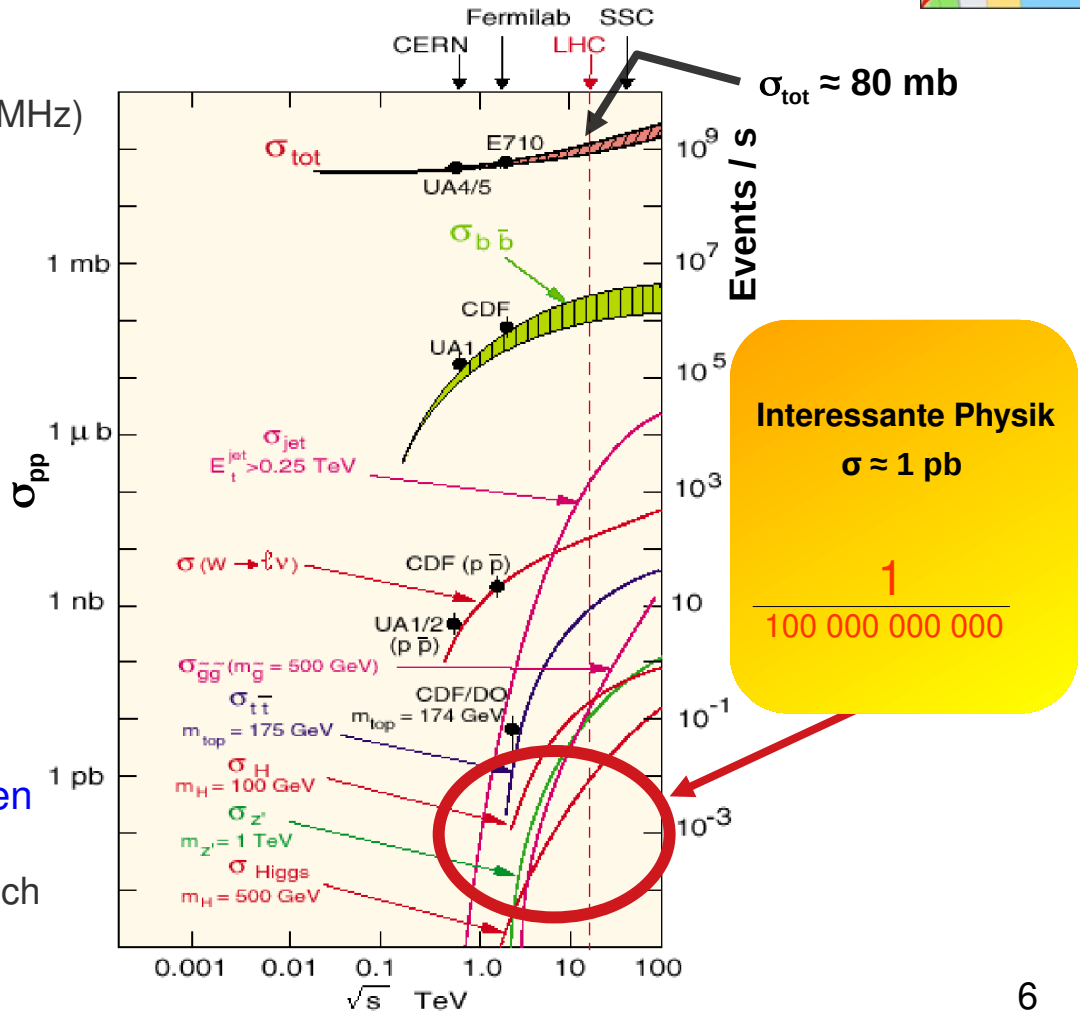
Daten und Physik

- Millionen von Auslesekanälen (~142 x 10^6)
  - Hunderte von Teilchen im Detektor alle 25ns (40MHz)
  - Prozessieren in der Front-End Elektronik
    - Nullunterdrückung, einfache Kompression

- ~10 MB Daten pro Bunch Crossing (Phase 2)
  - Ereignis Rate:
    $L^*\sigma_{tot} = 6x10^{34} * 100x10^{-27} = 6x10^9$ Hz
    ~200 Ereignisse pro Bunch Crossing
  - ~30MHz = 300TB/s
  - LHC läuft **140 Tage im Jahr mit 50% "uptime"**

    : **1.8 x 10^9 TB / Jahr 1.8 Zettabytes / Jahr**
    - Zu viel zum Speichern oder Prozessieren
    - Das meiste ist bekannte Physik

- Wir müssen die Interessanten Ereignisse auswählen O(10kHz)
  - ~60 PB/Jahr : Speichern und Prozessieren möglich



Interessante Physik

σ ≈ 1 pb

$$\frac{1}{100\,000\,000\,000}$$

Trigger: Trenne Spreu vom Weizen

- Reduktion der Datenrate von 30MHz auf 1kHz → **1 : 30 000**

Mehrere Trigger Stufen notwendig

- Der Trigger muss schnell arbeiten
  - Nicht möglich eine Entscheidung in 25ns zu fällen da Kabelwege zu lang sind O(1µs)
  - Alle anfallenden Daten (d.h. alle 25 ns alle Daten des Detektors) müssen während der Entscheidungsprozedur in der Detektor-Elektronik gespeichert werden → teurer Speicher
  - Daten müssen in einer Pipeline verarbeitet (und gespeichert) werden (40MHz Takt)
- Triggern ist riskant: Was weg ist, ist weg...
  - Die Effizienz des Triggers für interessante Physikprozesse muss genau bestimmt werden
    - Grosse Effizienz für interessante Prozesse
  - Fehlverhalten des Triggers kann leicht zu falschen Physik Resultaten führen
    - Schwer zu analysieren
  - Deshalb: Redundanz, Cross-checks,
    - z.B. “Random Trigger” mit fester Rate
-

Konzepte: Der Trigger

Der Trigger

Wir brauchen ein Inhaltverzeichnis von jedem Ereignis

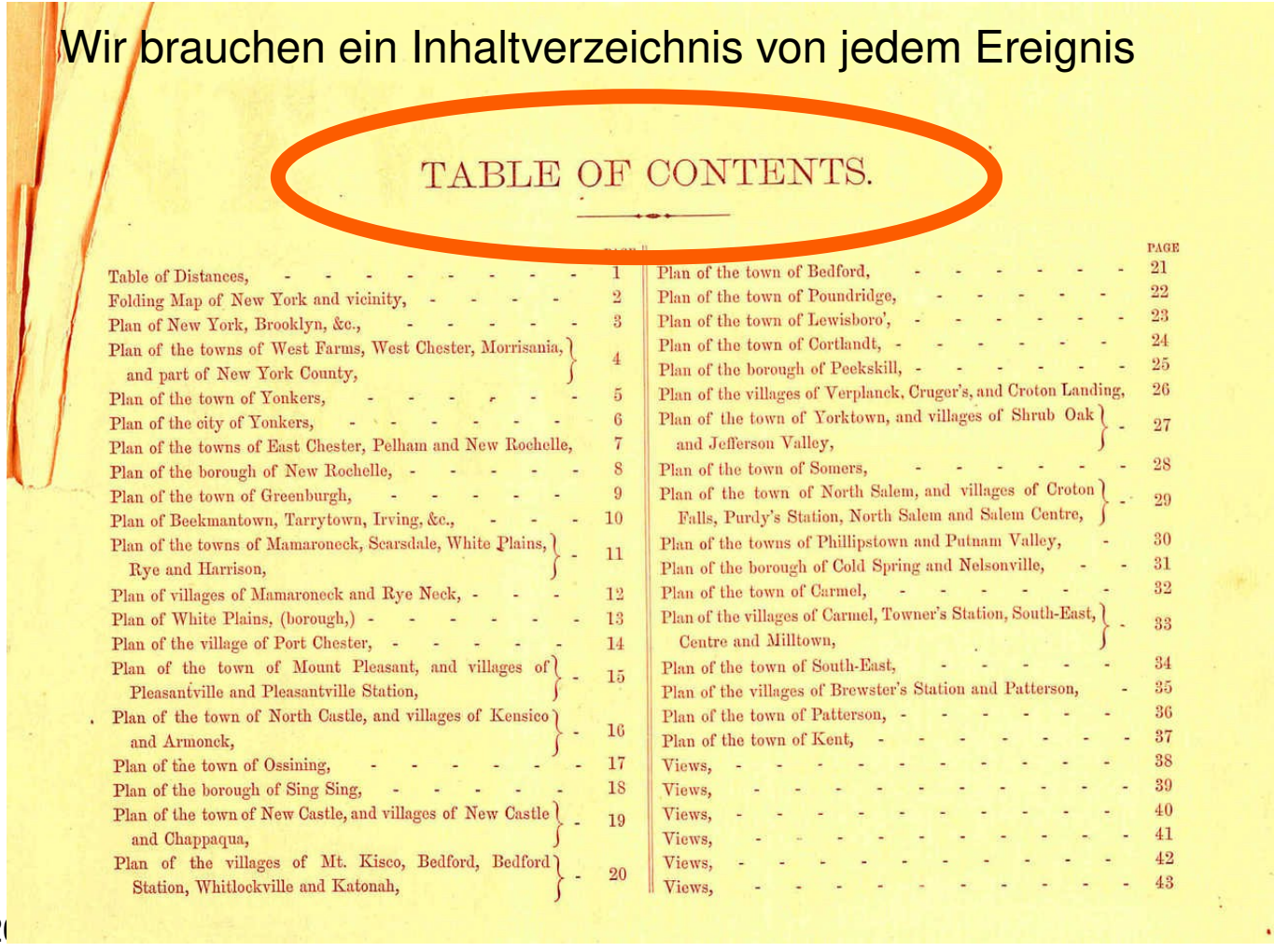
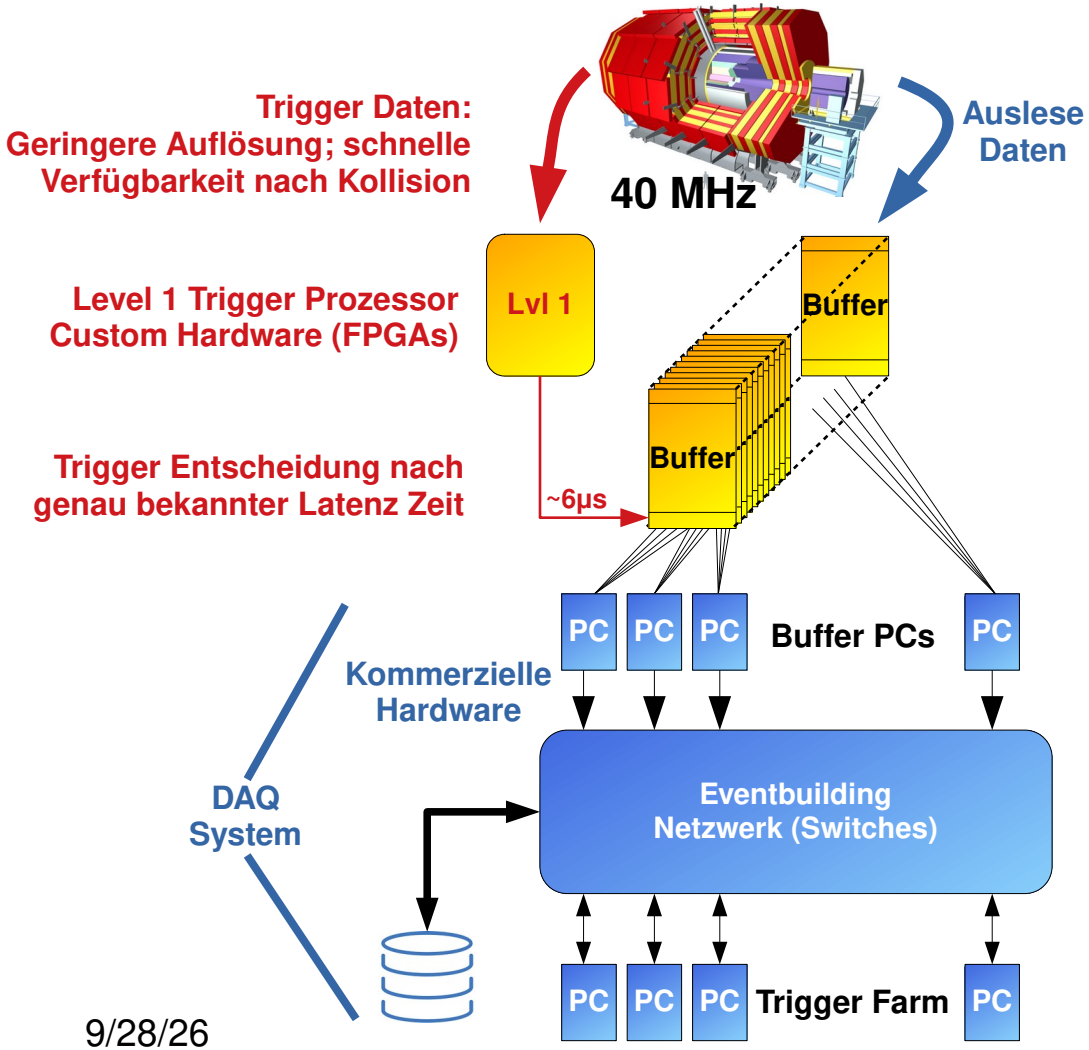


TABLE OF CONTENTS.

	PAGE
Table of Distances,	1
Folding Map of New York and vicinity,	2
Plan of New York, Brooklyn, &c.,	3
Plan of the towns of West Farms, West Chester, Morrisania, and part of New York County,	4
Plan of the town of Yonkers,	5
Plan of the city of Yonkers,	6
Plan of the towns of East Chester, Pelham and New Rochelle,	7
Plan of the borough of New Rochelle,	8
Plan of the town of Greenburgh,	9
Plan of Beekmantown, Tarrytown, Irving, &c.,	10
Plan of the towns of Mamaroneck, Scarsdale, White Plains, Rye and Harrison,	11
Plan of villages of Mamaroneck and Rye Neck,	12
Plan of White Plains, (borough,)	13
Plan of the village of Port Chester,	14
Plan of the town of Mount Pleasant, and villages of Pleasantville and Pleasantville Station,	15
Plan of the town of North Castle, and villages of Kensico and Armonck,	16
Plan of the town of Ossining,	17
Plan of the borough of Sing Sing,	18
Plan of the town of New Castle, and villages of New Castle and Chappaqua,	19
Plan of the villages of Mt. Kisco, Bedford, Bedford Station, Whitlockville and Katonah,	20
Plan of the town of Bedford,	21
Plan of the town of Poundridge,	22
Plan of the town of Lewisboro',	23
Plan of the town of Cortlandt,	24
Plan of the borough of Peekskill,	25
Plan of the villages of Verplanck, Cruger's, and Croton Landing,	26
Plan of the town of Yorktown, and villages of Shrub Oak and Jefferson Valley,	27
Plan of the town of Somers,	28
Plan of the town of North Salem, and villages of Croton Falls, Purdy's Station, North Salem and Salem Centre,	29
Plan of the towns of Phillipstown and Putnam Valley,	30
Plan of the borough of Cold Spring and Nelsonville,	31
Plan of the town of Carmel,	32
Plan of the villages of Carmel, Towner's Station, South-East, Centre and Milltown,	33
Plan of the town of South-East,	34
Plan of the villages of Brewster's Station and Patterson,	35
Plan of the town of Patterson,	36
Plan of the town of Kent,	37
Views,	38
Views,	39
Views,	40
Views,	41
Views,	42
Views,	43

Trigger & DAQ Implementierung: 2 Stufen



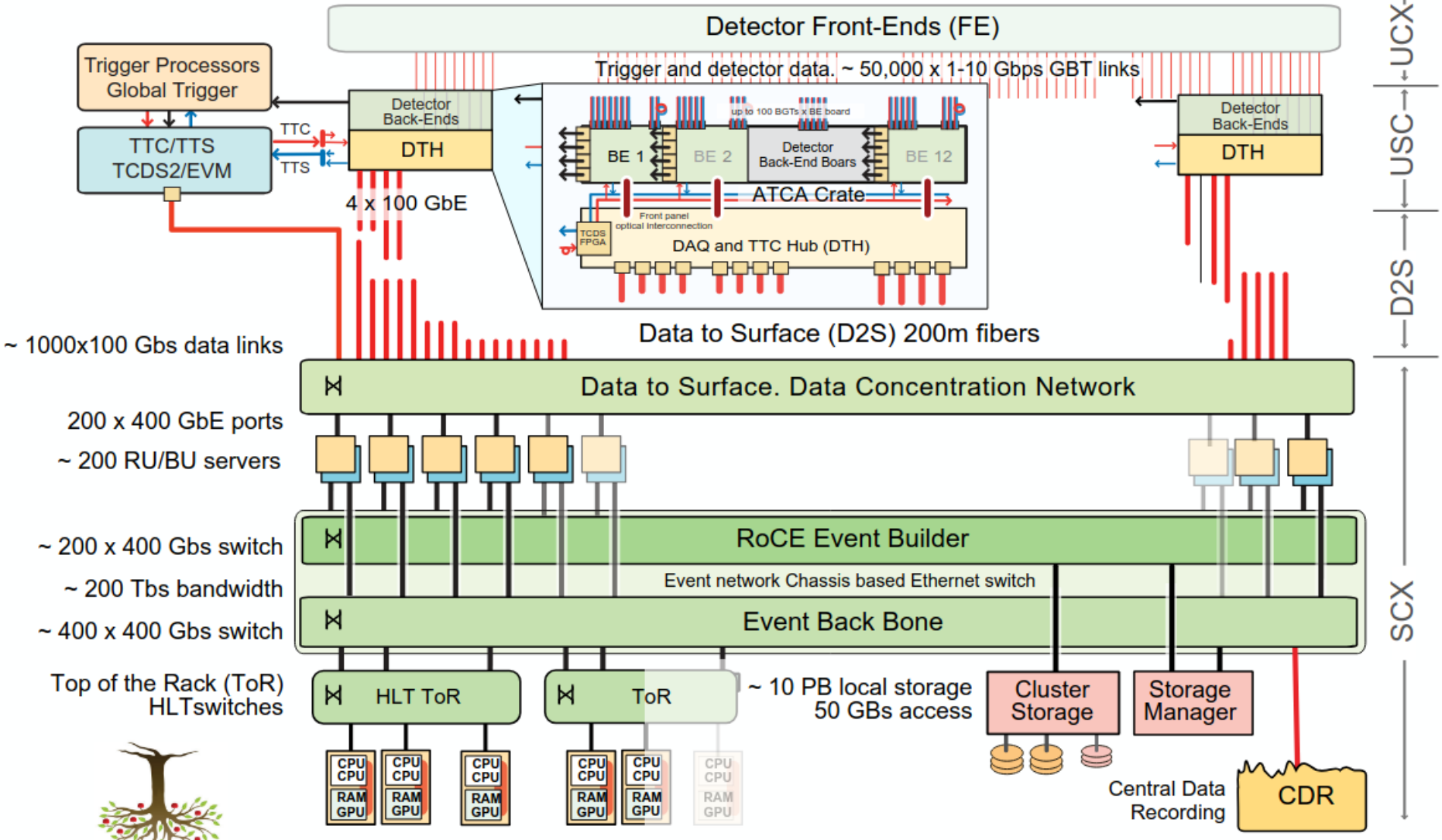
"De-Randomizer" Buffer: hält Daten bis zur Trigger-Entscheidung

750kHz Datenauslese

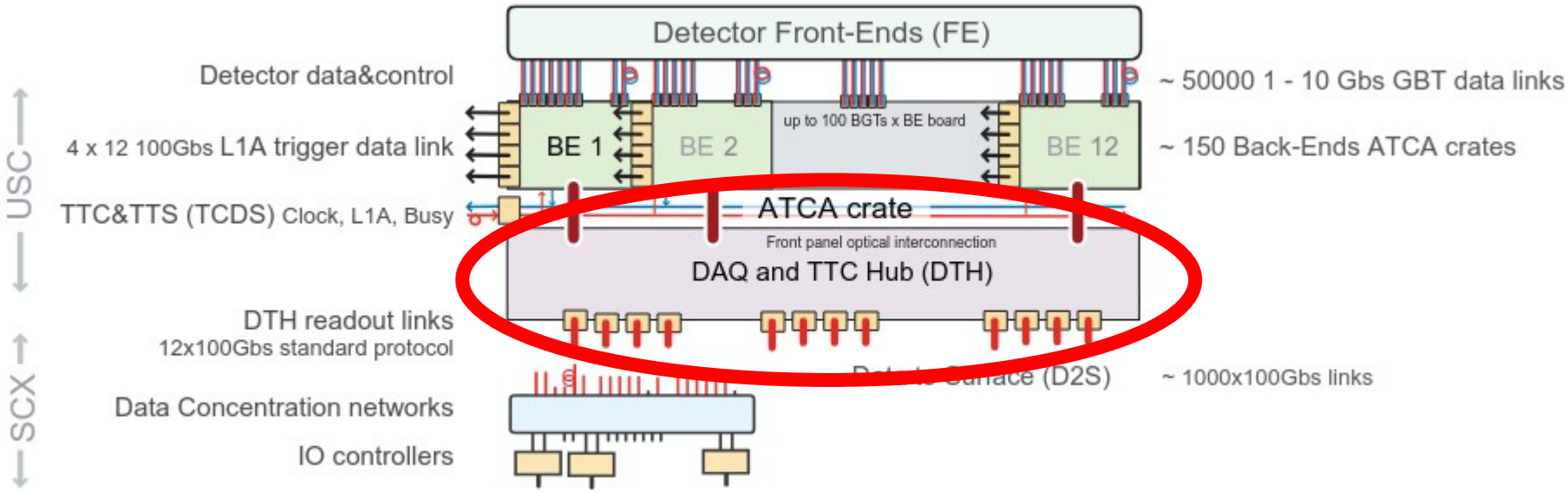
Event Building: Daten von der selben Kollision werden zu einem PC in der Farm geschickt.

High Level Trigger: Daten werden mit Software analysiert. Rate von 750kHz auf O(10kHz) reduziert

CMS DAQ Layout



Lab Besuch



Custom Elektronik Module

Interface : Custom Elektronik ↔ Kommerzielle IT Hardware

Fragen

Einführung

Teilchenphysik

- Welches sind die fundamentalen (i.e. kleinsten und unzerteilbaren) Teilchen dieser Welt
- Welches sind ihre charakteristischen Eigenschaften
- Was für Kräfte wirken zwischen Ihnen

Theorie

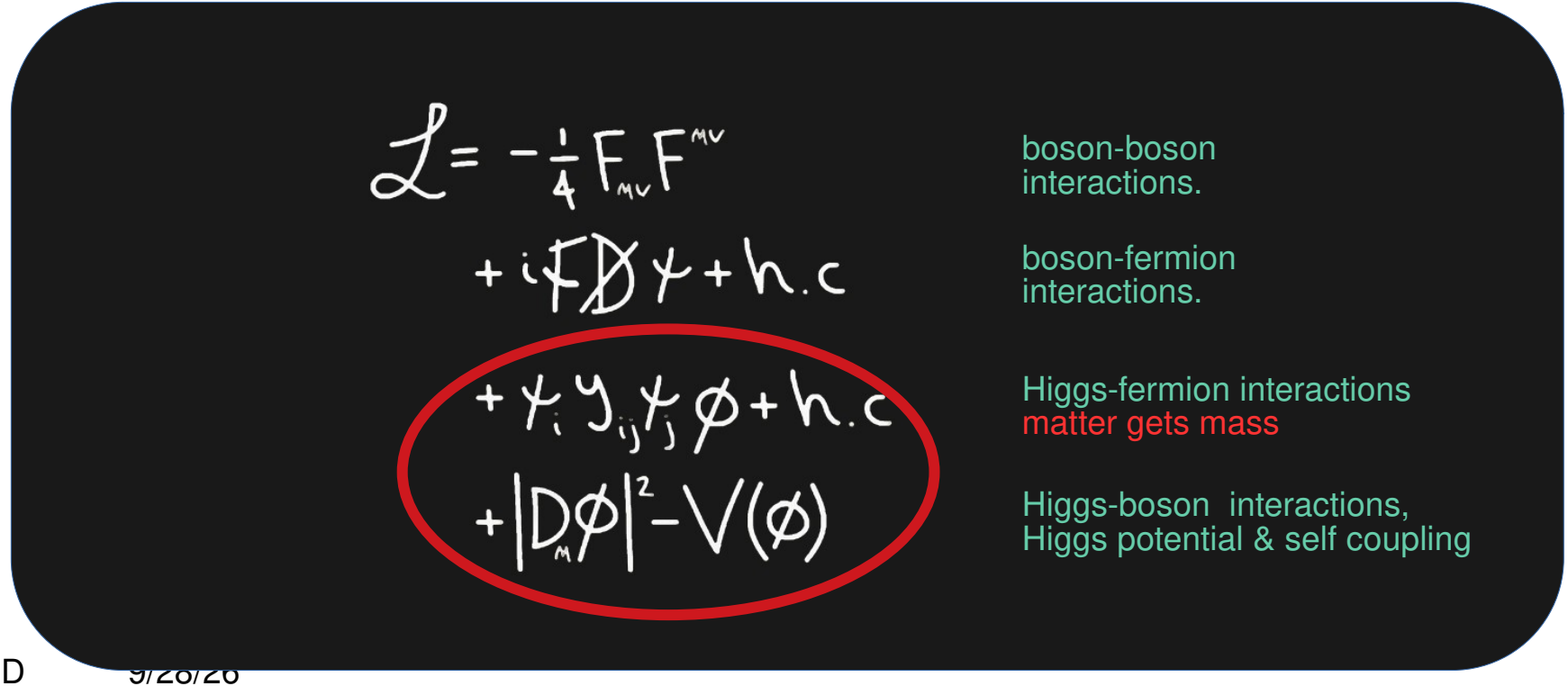
- Beschreibung der Natur mit dem Werkzeug “Mathematik”
- Physikers “Credo”:
  - Die Natur folgt “einfachen” Gesetzen.
  - Aus wenigen einfachen fundamentalen Gesetzen lässt sich (im Prinzip) alles in der Welt beschreiben
  - Mathematik ist die richtige Sprache, um die Natur zu beschreiben

Experiment

- Messen und Beobachten unter wohl kontrollierten und reproduzierbaren Rahmenbedingungen
- Vergleich mit Vorhersagen der Theorien → Bestätigen oder Verwerfen der Theorie
- Suche nach dem Unbekannten Neuen (nicht an Theorie gebunden)

Geschmacksfrage (I)
Was ist „einfach“ ?

- Das „Standardmodell“ beschreibt den heutigen Wissensstand:
  - Teilchenarten: **Fermionen** (Materie) und **Bosonen** (vermitteln Kräfte)
  - Basis ist die sogenannte Langrange Dichte:

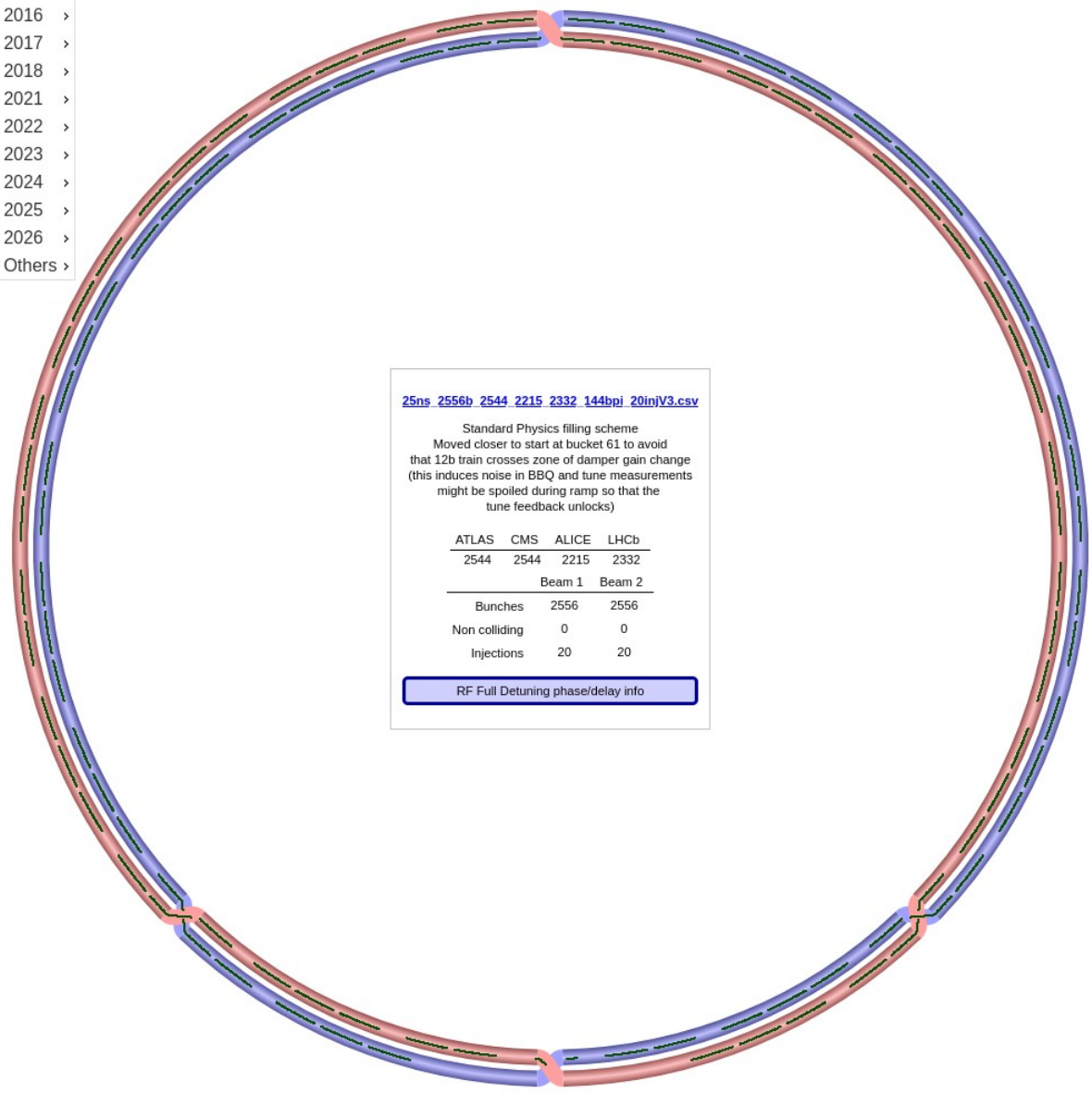


Geschmacksfrage (II)
Was ist „einfach“ ?

Der „einfache“ Langrangian in voller Schönheit ausgeschrieben

$$
\begin{aligned}
&\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - \\
&M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \\
&igs_w(\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - \\
&W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - \\
&Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
&\beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g} H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-) \right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - \\
&g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-) - \\
&\tfrac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
&gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \\
&\tfrac{1}{2}ig\left(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)\right) + \\
&\tfrac{1}{2}g\left(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)\right) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + \\
&M\left(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+\right) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_wMA_\mu(W^+_\mu\phi^- - \\
&W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_wA_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \\
&\tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-) - \\
&\tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + \\
&W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - \\
&g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + \\
&m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_wA_\mu\left(-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \\
&\tfrac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\{(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + \\
&(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left((\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}{}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right) + \\
&\tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}{}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right) + \\
&\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa)\right) + \\
&\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}{}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}{}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa)\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \\
&\tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\,\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa - \\
&\tfrac{1}{4}\,\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j)\right) + \\
&\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j)\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \\
&\tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu\bar{G}^a G^b g^c_\mu + \\
&\bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \\
&\partial_\mu\bar{X}^+X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \\
&\partial_\mu\bar{X}^0X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \\
&\partial_\mu\bar{X}^-X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \\
&\partial_\mu\bar{X}^-X^-) - \tfrac{1}{2}gM\left(\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \tfrac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H\right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-\right) + \\
&\tfrac{1}{2c_w}igM\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + igMs_w\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + \\
&\tfrac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0\right) .
\end{aligned}
$$

2016 ›
2017 ›
2018 ›
2021 ›
2022 ›
2023 ›
2024 ›
2025 ›
2026 ›
Others ›



25ns_2556b_2544_2215_2332_144bpi_20injV3.csv

Standard Physics filling scheme
Moved closer to start at bucket 61 to avoid
that 12b train crosses zone of damper gain change
(this induces noise in BBQ and tune measurements
might be spoiled during ramp so that the
tune feedback unlocks)

ATLAS	CMS	ALICE	LHCb
2544	2544	2215	2332

	Beam 1	Beam 2
Bunches	2556	2556
Non colliding	0	0
Injections	20	20

RF Full Detuning phase/delay info