

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Quantenfeldtheorie und Standardmodell	3
2.1	Das Standardmodell der Teilchenphysik	3
2.2	Effektive Quantenwirkung und Gell-Mann-Low Gleichung	4
3	QCD \times dark QCD	6
3.1	Die Standardmodell QCD	6
3.2	Dark QCD	7
4	Schleifen	7
5	Untersuchung einer β-Funktion	8
5.1	Vereinfachung des mathematischen Problems	9
5.2	Verhalten in einer Umgebung eines Fixpunktes	10
5.3	Laufende Kopplungen im Standardmodell	13
5.3.1	QED	13
5.3.2	QCD	13
6	β-Funktion im \mathbb{R}^2	14
6.1	Stabilitätsbedingungen	14
6.1.1	hyperbolischer Fixpunkt	15
6.1.2	nicht-hyperbolischer Fixpunkt	16
6.2	Fixpunktextrapolation	17
7	UV-Fixpunkte der $SU_{\text{QCD}} \times SU_{\text{dQCD}}$	19
7.1	UV-Verhalten bei α^{*4}	20
7.1.1	attraktiver Fixpunkt	20
7.1.2	Sattelpunkt	21
7.2	UV-Verhalten bei α^{*3}	25
7.3	UV-Verhalten bei α^{*2}	26
	Literatur	28

1 Einleitung

Die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 [3] und die erstmalige Beobachtung von Gravitationswellen im Jahr 2016 [4] sind weitere Bestätigung zweier fundamentaler Theorien der heutigen Physik, des *Standardmodells der Teilchenphysik (SM)* und der *allgemeinen Relativitätstheorie (ART)*, die es vermögen, Phänomene auf Größenordnungen der Quantenphysik beziehungsweise der Kosmologie mit großer Genauigkeit zu beschreiben und zu erklären. Obwohl das SM durch die Entdeckung des Higgs in sich geschlossen ist, gibt es Hinweise sowohl von experimenteller als auch von theoretischer Seite, dass dieses Theoriegebäude nicht endgültig sein kann.

Kosmologische Experimente zeigen, dass es eine Art der Materie, *dunkle Materie (DM)*, mit einer Energiedichte von $\Omega_{\text{DM}} \approx 0,2$ in Einheiten der kritischen Massendichte im Universum geben muss [1], die eine schwache Ankopplung an die SM-Materie haben muss, jedoch gravitativ wechselwirkt. Im Rahmen von Λ CDM-Theorien wird eine kalte, d.h. nichtrelativistische, DM vorhergesagt, sodass Teilchentheorien mit schweren, schwach ans SM gekoppelten Elementarteilchen¹ naheliegend sind. Y. Bai und P. Schwaller schlagen dagegen vor, die DM Masse analog zur Masse der bekannten baryonischen Materie zu erzeugen. Die Masse der normalen Materie, d.h. der Protonen und Neutronen, wird im wesentlichen durch Quark und Gluon Wechselwirkungen der *Quantenchromodynamik (QCD)* erzeugt. Eine analoge Dynamik, genannt *dark QCD (dQCD)*, zusammen mit einem Mechanismus, der die Baryogenese in den dunklen Sektor erweitert, kann damit eine alternative Erklärung für DM sein. [6]

Von theoretischer Seite aus sind SM und ART völlig disjunkt, in dem Sinne, dass das SM keine gravitativen Wechselwirkungen enthält und die ART eine klassische, d.h. nicht quantisierte, Theorie ist. Um die in der ART auftretenden Singularitäten konsistent beschreiben zu können, ist eine umfassendere Theorie der Gravitation auf quantenphysikalischen Skalen nötig [8]. Da es sich in beiden Fällen um eine Feldtheorie handelt, ist es naheliegend, die Wirkung der ART analog zum SM über den Pfadintegralformalismus nach Feynman zu quantisieren [9]. Praktisch führt dieses Vorgehen jedoch zu nichtrenormierbaren Theorien [10], die in der Regel unendlich viele Renormierungskonstanten erfordern um auf allen Energieskalen gültig zu sein und die deshalb häufig als unphysikalisch oder ungeeignet als fundamentale Theorie gelten. Durch ein *asymptotic safety (AS)* Szenario ist es jedoch möglich, die Theorie bis auf eine endliche Zahl von Parametern zu bestimmen, sodass AS als Erweiterung der üblichen Forderung nach Renormierbarkeit verstanden werden kann [10] [17]. Hierbei wird die Energieskalenabhängigkeit der Kopplungskonstanten einer Theorie mit Hilfe von *Renormierungsgruppen (RG)* untersucht; wenn die Kopplungskonstanten auf bestimmten Hyperfläche im Phasenraum der Kopplungskonstanten liegen ist das Energieskalenverhalten bis auf den Freiheitsgrad der Dimension dieser Hyperfläche bestimmt.

¹Sog. WIMPs, weakly interacting massive particles

2 Quantenfeldtheorie und Standardmodell

In einer *Quantenfeldtheorie* (QFT) werden physikalische Entitäten als Anregungszustände von Quantenfeldern verstanden. Ein Schlüssel zu den experimentell zugänglichen Wirkungsquerschnitten ist die Berechnung von *Korrelatorfunktionen* oder *n-Punkt Funktionen*

$$\langle T \phi^{r_1}(x_1) \dots \phi^{r_N}(x_N) \rangle = \frac{\int \mathcal{D}\phi \phi^{r_1}(x_1) \dots \phi^{r_N}(x_N) e^{iS[\phi]}}{\int \mathcal{D}\phi e^{iS[\phi]}} \quad (1)$$

im Pfadintegralformalismus von Feynman [15]. Die Information über die möglichen physikalischen Prozesse der Quantenfelder ϕ ist dabei in dem Wirkungsfunktional S bzw. der Lagrangedichte \mathcal{L} enthalten, welche in einer d -Dimensionalen Raumzeit über

$$S[\phi] = \int d^d x \mathcal{L}(\phi, \partial\phi, t) \quad (2)$$

verknüpft sind [15]. Die möglicherweise verschiedenartigen Felder ϕ^{r_i} können dabei in verschiedene Räume abbilden und somit Teilcheneigenschaften, insbesondere Transformationseigenschaften unter Eichsymmetrien, darstellen.

2.1 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das SM ist eine QFT nach dem Prinzip, invariant unter bestimmten Symmetrietransformationen zu sein. Die Dynamik wird dabei durch die Eichgruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ in der Lagrangedichte repräsentiert, sowie der Angabe, unter welcher Darstellung der Eichgruppe die Felder transformieren. Neben den postulierten Feldern der Quarks, Leptonen und des Higgs wird so die Existenz von Eichfeldern und Wechselwirkungen mit den übrigen Feldern gefordert, welche keine Singletts der entsprechenden Eichgruppe sind.

Im SM kennt man bisher sechs Quark-Flavour, *up* (u), *down* (d), *charm* (c), *strange* (s), *top* (t), und *bottom* (b), die als Dirac-Fermionen in der Lagrangedichte auftauchen. Ebenfalls als Dirac-Fermionen werden die geladenen Leptonen, das *Elektron* (e^-), das *Myon* (μ^-) und das *Tauon* (τ^-) eingeführt. Die drei *Neutrinos* ν_e , ν_μ und ν_τ kommen dagegen ausschließlich als linkshändige Weyl-Spinoren vor, sodass sie im SM masselos sein müssen. Das einzige skalare Feld des SM ist das *Higgs-Feld* (ϕ), welches im Higgsmechanismus für die Brechung der Symmetriegruppe verantwortlich ist.

Als eine der fundamentalen Kräfte des SM beschreibt die *Quantenchromodynamik* (QCD) die Wechselwirkungen zwischen Quarks, den Bausteinen der Hadronen, und den Gluonen, den Eichfeldern der QCD. Die mathematische Beschreibung erfolgt durch Dar-

stellungen der $SU(3)$, bei der einem Quark ψ^f mit Flavour f ein Colour-Triplett $\psi = (\psi_1^f, \psi_2^f, \psi_3^f)^T$ zugeordnet wird. Außerdem folgt die Existenz von acht masselosen Gluonen, die mit Quarks und untereinander wechselwirken [7]. Eine genauere mathematische Beschreibung folgt in Abschnitt ?? . Charakteristisch für die QCD des SM ist die in Abbildung ?? dargestellte Energieabhängigkeit der QCD Kopplungskonstanten. Der Landau-Pol bei Λ_{QCD} ist dabei für die hadronische Bindung bei niedrigen Energien verantwortlich und somit insbesondere für die baryonische Massendichte Ω_B im Universum, während es bei hohen Energien gerade zum AF kommt.

Die Symmetriegruppe $SU(2) \times U(1)$ beschreibt die Elektroschwache Wechselwirkung. In ihr werden die Wechselwirkungen zwischen linkshändigen Isospin-Dupletts

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu_L^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau_L^- \end{pmatrix} \quad (3)$$

über insgesamt vier Eichbosonen beschrieben. Durch den Higgsmechanismus wird die Symmetriegruppe zu einer $U(1)$ gebrochen, welche als Elektromagnetismus identifiziert werden kann. Als Eichbosonen der gebrochenen Symmetrie entstehen die massiven Bosonen W^+ , W^- und Z sowie das masselose Photon.

Im Higg-Sektor gibt es neben einem Potenzial $V[\phi]$ sogenannte Yukawa-Kopplungen der Form $Y_{ij} Q_L^i \phi q_R^j$ zwischen einem Isospin-Duplett Q_L^i , dem Higgsfeld ϕ und einem rechtshändigen Fermion q_R^j , mit der Kopplungsstärke Y_{ij} . Im Higgsmechanismus wird das Potenzial $V[\phi]$ minimiert und die $SU(2) \times U(1)$ Symmetrie unterhalb einer charakteristischen Energieskala gebrochen, was die Massenerzeugung der Teilchen und das Flavour-Mixing der Quarks zur Folge hat. [?]

Da in dieser Arbeit wird eine Standardmodellerweiterung im QCD-Sektor untersucht werden soll, werden der Elektroschwache Sektor sowie der Higgs-Sektor nicht weiter Betrachtet. Die einzige Ausnahme ist Abschnitt 5.3, in dem die β -Funktionen des Standardmodells vorgestellt werden.

2.2 Effektive Quantenwirkung und Gell-Mann-Low Gleichung

Um das Hochenergieverhalten von Wechselwirkungen zu untersuchen, ist es sinnvoll die *Quantenwirkung* Γ einzuführen. Dazu werden nun die wichtigsten Punkte der Berechnung von Korrelationsfunktionen mit Hilfe von erzeugenden Funktionalen gezeigt².

Der Einfachheit halber wird nun nur ein komplexes Fermionfeld ψ und ein komplexes Skalarfeld ϕ betrachtet. Wegen der linearen Eigenschaften von (1) ist die Erweiterung

²Für das Vorgehen beim reellen, skalaren Feld vgl. [20], für die Erweiterung mit Fermionen vgl. [15].

auf mehrere Felder trivial. Lorentz- und Eichinvarianz der Lagrangedichte erfordern direkt die Einführung der Felder $\bar{\psi}$ und ϕ^{*3} . Das *erzeugende Funktional* wird definiert als

$$Z[J] := \int \mathcal{D}\Psi \, e^{iS[\Psi] + i \int d^d x (J \cdot \Psi)} \quad , \quad (4)$$

dabei wurden die Ströme $\eta, \bar{\eta}, \zeta$ und ζ^* und die Schreibweise $J = (\eta, \bar{\eta}, \zeta, \zeta^*)^T$ und $\Psi = (\bar{\psi}, \psi, \phi^*, \phi)^T$ eingeführt. Eine Reihenentwicklung kann durch

$$Z[J] = \sum_{\alpha} \frac{i^{|\alpha|}}{\alpha!} \int dx_1 \dots dx_{|\alpha|} Z^{\alpha}(x_1, \dots, x_{|\alpha|}) J^{\alpha}(x) \quad (5)$$

definiert werden, mit einem vierer Multiindex $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ und der Schreibweise

$$J^{\alpha} = \eta(x_1) \dots \eta(x_{\alpha_1}) \bar{\eta}(x_{\alpha_1+1}) \dots \bar{\eta}(x_{\alpha_1+\alpha_2}) \zeta(x_{\alpha_1+\alpha_2+1}) \dots \zeta(x_{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3}) \zeta^*(x_{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+1}) \dots \zeta^*(x_{|\alpha|}) \quad . \quad (6)$$

Die Funktionen Z^{α} können über die Funktionalableitung

$$Z^{\alpha}(y_1, \dots, y_{|\alpha|}) \stackrel{(5)}{=} \left[\frac{\partial}{i^{|\alpha|} \partial J^{\alpha}(y)} \right]_{J=0} Z[J] \stackrel{(4)}{=} \int \mathcal{D}\Psi \, \Psi^{\alpha}(y) e^{iS[\Psi]} \stackrel{(1)}{=} \langle \mathbf{T} \Psi^{\alpha}(y) \rangle \quad (7)$$

als n -Punkt Funktionen verstanden werden. Zur Vereinfachung wurde dabei Ψ^{α} analog zu (6) definiert und $Z[0] = 0$ gesetzt.

Mit der Definition des Funktionals $W[J] := \ln Z[J]$ und einer Reihenentwicklung wie in (5) erhält man Funktionen W^{α} , die die Cluster-Eigenschaft erfüllen [20]. Sind A und B Ströme mit disjunkten Trägern⁴ und $y_1 \in \text{supp} A, y_2 \in \text{supp} B$, dann müssen $W^{\alpha}(\dots, y_1, \dots, y_2, \dots) \xrightarrow{\|y_1 - y_2\| \rightarrow \infty} 0$. Aufgrund dieser Eigenschaft ist $W[J]$ das erzeugende Funktional ver

³Cite

⁴Dabei können A und B eine Zerlegung eines Stroms $J_i = A + B$ oder zwei verschiedene, z.B $A = \eta, B = \phi$ sein.

3 QCD × dark QCD

Das Verhalten der QCD-Kopplungskonstanten ist im Standardmodell allein nicht im Stande ein asymptotic safety Szenario zu entwickeln, wie in Abschnitt 5.3 gezeigt wird. Durch die Erweiterung der QCD um eine weitere Eichgruppe, die dark QCD, ergeben sich qualitativ völlig neue Möglichkeiten im Hochenergieverhalten der Kopplungskonstanten.

3.1 Die Standardmodell QCD

Im Standardmodell wird die QCD durch die Symmetriegruppe $SU(N_c)$ dargestellt, unter der sich die Quarks in der *fundamentalen Darstellung* und die Gluonen in der *adjungierten Darstellung* transformieren. Im SM gibt es $N_{\text{Flavour}} = 6$ verschiedene Quarkflavour und $N_{\text{Colour}} = 3$ Colours, da die QCD Flavour-Blind ist, d.h. da die Wechselwirkung unabhängig von der Flavour-Quantenzahl ist, ist die Erweiterung auf N_c Colour und n_f Flavour jedoch trivial. Die Lagrangedichte kann als

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}_a^f \left(i\gamma^\mu \partial_\mu \delta_{ab} - g_1 \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C - m_f \delta_{ab} \right) \psi_b^f - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} \quad (8)$$

geschrieben werden [2]. Dabei stellt ψ_b^f ein Quarkfeld mit Colour $b \in \{1, 2, \dots, N_c\}$ und Flavour $f \in \{1, 2, \dots, n_f\}$ und mit der Masse m_f dar, g_1 ist die Kopplungskonstante der QCD. Man nennt $\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_c})^T$ ein Colour-Multiplett⁵ unter der fundamentalen Darstellung, wenn es unter Anwendung der $SU(N_c)$ gemäß

$$\psi(x) \longrightarrow \underbrace{U(x)}_{\in \mathbb{C}^{N_c \times N_c}} \psi(x) \quad , \quad \bar{\psi}(x) \longrightarrow \bar{\psi}(x) U(x)^\dagger \quad (9)$$

transformiert. Die Gluonfelder \mathcal{A}_μ^C mit $C \in \{1, 2, \dots, N_c^2 - 1\}$ und Erzeugern $t^C \in \mathbb{C}^{N_c \times N_c}$ transformieren dagegen in der adjungierten Darstellung [18]

$$t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C(x) \longrightarrow U(x) t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C(x) U(x)^\dagger - i(\partial_\mu U(x)) U(x)^\dagger \quad . \quad (10)$$

Die Dynamik und Propagation der Gluonen wird dabei durch den Feldstärketensor vermittelt,

$$F_{\mu\nu}^A = \partial_\mu \mathcal{A}_\nu^A - \partial_\nu \mathcal{A}_\mu^A - g f_{ABC} \mathcal{A}_\mu^B \mathcal{A}_\nu^C \quad , \quad [t^A, t^B] = i f_{ABC} t^C \quad . \quad (11)$$

Versucht man die QCD im Feynmanformalismus zu quantisieren, werden außerdem Eichfixierung und Faddeev-Popov-de-Witt Ghosts benötigt [18], diese können jedoch nach der Modellbildung hinzugefügt werden, sodass sie hier nicht auftauchen.

⁵Der Flavour-Index f wird ab jetzt weggelassen.

3.2 Dark QCD

In [6] wird die dQCD eingeführt, um die DM Massendichte Ω_{DM} im Universum zu erklären. Dazu wird das Niederenergieverhalten der neu eingeführten Kopplungskonstanten g_2 auf die Confinement Scale Λ_{dQCD} untersucht, die analog zur QCD Confinement Scale Λ_{QCD} die Größenordnung der Baryonmasse bestimmt. Die Theorie ist aber, ebenfalls analog zur QCD, auch bis zu beliebig hohen Energieskalen anwendbar und soll hier auf ihr Hochenergieverhalten untersucht werden.

Die Lagrangedichte der dQCD kann analog zu (8) als

$$\mathcal{L}_{\text{dQCD}} = \bar{\xi}_a^f \left(i\gamma^\mu \partial_\mu \delta_{ab} - g_2 \gamma^\mu \tilde{t}_{ab}^C \tilde{\mathcal{A}}_\mu^C - \tilde{m}_f \delta_{ab} \right) \xi_b^f - \frac{1}{4} \tilde{F}_{\mu\nu}^A \tilde{F}^{A\mu\nu} \quad (12)$$

definiert werden. Die Fermionen ξ^f der dQCD sollen in der fundamentalen Darstellung der $SU(N_d)$ sein, entsprechend laufen die Indizes $b \in \{1, 2, \dots, N_d\}$ und $f \in \{1, 2, \dots, n_{f_d}\}$, während die Felder der Eichbosonen $\tilde{\mathcal{A}}_\mu^C$ wieder in der adjungierten Darstellung transformieren, der Feldstärketensor $\tilde{F}_{\mu\nu}^A$ wird wie in (11) definiert. Wie sich in Abschnitt 7 zeigen wird begünstigt eine hohe Teilchenzahl die auftretenden Fixpunkte dahingehend, dass sie betragsmäßig kleiner werden und somit unter perturbative Kontrolle kommen, ohne ihr UV-attraktives Verhalten zu verlieren, wie es bei einer Theorie mit ausschließlich Fermionen der Fall wäre. Skalare ϕ^f und χ^f unter der QCD bzw. dQCD können über

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}}^S = \left(\left[i\delta_{ab} - g_1 t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C - \frac{1}{2} m_f^2 \delta_{ab} \right] \phi_a^f \right)^\dagger \left(\left[i\delta_{ab} - g_1 t_{ab}^C \mathcal{A}^{C\mu} - \frac{1}{2} m_f^2 \delta_{ab} \right] \phi_b^f \right) \quad (13)$$

$$\mathcal{L}_{\text{dQCD}}^S = \left(\left[i\delta_{ab} - g_2 \tilde{t}_{ab}^C \tilde{\mathcal{A}}_\mu^C - \frac{1}{2} \tilde{m}_f^2 \delta_{ab} \right] \chi_a^f \right)^\dagger \left(\left[i\delta_{ab} - g_2 \tilde{t}_{ab}^C \tilde{\mathcal{A}}^{C\mu} - \frac{1}{2} \tilde{m}_f^2 \delta_{ab} \right] \chi_b^f \right) \quad (14)$$

eingeführt werden [14]

Aufgrund[5]

4 Schleifen

5 Untersuchung einer β -Funktion

An Gleichung ?? erkennt man, dass die β -Funktion einer QFT eine Seite eines Systems N gekoppelter, gewöhnlicher, nichtlinearer Differentialgleichungen der Form

$$\mu \frac{d}{d\mu} g_k(\mu) = P_k^{M_L}(g_1, \dots, g_N) =: \beta_k(g_1, \dots, g_N), \quad k = 1, \dots, N \quad (15)$$

ist. Dabei stellt jedes P_k ein Polynom maximal M_L -ten Grades in den Kopplungskonstanten dar. Der Grad des Polynoms hängt nur von der Ordnung der Störungstheorie ab, im Bild von Feynmangraphen entspricht dies der maximalen Anzahl L von Quantenschleifen, die in der Berechnung berücksichtigt werden. Hier ist es naheliegend, das DGL-System als Problem im \mathbb{R}^N zu betrachten. Mit $g := (g_1, \dots, g_N)^T$ und $\beta := (\beta_1, \dots, \beta_N)^T$ lässt sich (15) auch als

$$\mu \frac{d}{d\mu} g(\mu) = \beta(g) \quad (16)$$

schreiben. Dann heißt \mathbb{R}^N auch der Phasenraum der β -Funktion.

Definition 5.1. Eine *Trajektorie im Phasenraum* ist eine Funktion $g : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^N$, die die Gleichung (16) löst.

Ein *Fixpunkt der β -Funktion* ist ein Punkt $g^* \in \mathbb{R}^N$, für den $\beta(g^*) = 0$ gilt.

Eine physikalisch sinnvolle QFT sollte für beliebige Energieskalen, insbesondere für beliebig hohe Energieskalen, Vorhersagen machen können, sofern sie nicht von Beginn an als effektive Theorie angesetzt ist. Für die Kopplungskonstanten heißt das, dass für $\mu \rightarrow \infty$ die Grenzwerte $g(\mu) \rightarrow g^*$ und $\beta(g(\mu)) \rightarrow 0$ erreicht werden müssen um ein stabiles Hochenergieverhalten zu gewährleisten. Demnach sind gerade die Fixpunkte der β -Funktion die möglichen Grenzwerte der Kopplungskonstanten.

Im Laufe der Untersuchung der β -Funktion haben sich die folgenden Bezeichnungen entwickelt.

Gaußscher Fixpunkt: Ist der Punkt $g^* = 0$ ein Fixpunkt der β -Funktion, so spricht man von einem Gaußschen Fixpunkt.

Banks-Zaks Fixpunkt: Ein Fixpunkt $g^* \neq 0$, der physikalisch sinnvoll und perturbativ ist, heißt Banks-Zaks oder Caswell-Banks-Zaks Fixpunkt.

Landau Pol: Besitzt die Lösung des Problems (16) mit Anfangswert $g(\mu_0) = g_0$ eine Polstelle $\mu_{\text{Pol}} < \infty$, sodass $g(\mu) \xrightarrow{\mu \rightarrow \mu_{\text{Pol}}} \infty$, dann spricht man von einem Landau-Pol.

5.1 Vereinfachung des mathematischen Problems

Die Berechnung einer Trajektorie als Lösung zum Anfangswertproblem (16) mit Anfangswert $g(\mu_0) = g_0$ ist in der Regel analytisch nicht möglich. Durch einige einfache Schritte lässt sich das Problem jedoch zunächst in die einfacher zu handhabende Form eines autonomen DGL-Systems überführen und sich das Verhalten in der Nähe eines Fixpunktes bestimmen.

In [10] schlägt S. Weinberg die Einführung der dimensionslosen Kopplungskonstanten

$$\bar{g}_i(\mu) := \mu^{-d_i} g_i(\mu) \quad (17)$$

vor, wobei d_i die Massendimension der Kopplungskonstanten g_i ist. Bei der Untersuchung der QCD \times dQCD- β -Funktion wird klar, dass die Erweiterung

$$\alpha_i(\mu) := \mathcal{N} (\bar{g}_i(\mu))^n \quad (18)$$

den Grad M_L der β -Funktion verringern kann und somit das Problem weiter vereinfacht (vgl. [6], [13]). Dabei dient \mathcal{N} als Normierungskonstante, die insbesondere von dimensionslosen Größen wie Teilchenzahlen oder Größen der Symmetriegruppe abhängen kann.

Beispiel 5.2. Für ein eindimensionales Problem

$$\mu \frac{d}{d\mu} g(\mu) = X g(\mu)^3 + Y g(\mu)^5 \quad (19)$$

und für den einfachen Fall $[g] = 0$ definiere

$$\alpha(\mu) := \mathcal{N} g(\mu)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{dg}{d\mu} g = \frac{1}{2\mathcal{N}} \frac{d\alpha}{d\mu} \quad (20)$$

Man erhält so eine einfachere Differentialgleichung mit den Koeffizienten $\tilde{X} = 2X\mathcal{N}^{-1}$ und $\tilde{Y} = 2Y\mathcal{N}^{-2}$,

$$\mu \frac{d}{d\mu} \alpha(\mu) = \tilde{X} \alpha(\mu)^2 + \tilde{Y} \alpha(\mu)^3 \quad (21)$$

Naheliegender wird wieder $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)^T$ und $\beta(\alpha) = \beta(g \circ \alpha)$ geschrieben.

Der physikalisch sinnvolle Wertebereich für die Energieskala μ ist $(0, \infty)$. Mit der Renormierungsgruppenzeit (RG-Zeit) t , definiert als

$$t(\mu) := \ln\left(\frac{\mu}{\Lambda}\right) \Leftrightarrow \mu(t) = e^t \quad (22)$$

gibt es eine Bijektion $(0, \infty) \xrightarrow{t} (-\infty, \infty)$, die es erlaubt die Kopplungskonstante als

$$\tilde{\alpha}(t) := \alpha(e^t) = \alpha(\mu) \quad (23)$$

zu schreiben. Der Parameter Λ ist beliebig und hat keine physikalische Bedeutung, er wird später lediglich die Extrapolation der Fixpunkte übersichtlicher gestalten. Es folgt

$$\mu \frac{d}{d\mu} \alpha(\mu) = \mu \underbrace{\frac{dt}{d\mu}}_{=\mu^{-1}} \frac{d}{dt} \tilde{\alpha}(t) = \frac{d}{dt} \tilde{\alpha}(t) \quad . \quad (24)$$

Damit ist Gleichung (16) äquivalent zu dem autonomen Differentialgleichungssystem

$$\frac{d}{dt} \alpha(t) = \beta(\alpha) \quad , \quad (25)$$

wobei $\tilde{\alpha}$ wieder zu α umbenannt wurde.

5.2 Verhalten in einer Umgebung eines Fixpunktes

Um das Verhalten der Kopplungskonstanten $\alpha(t)$ in der Nähe eines Fixpunktes zu untersuchen wird die Stabilitätsmatrix wie folgt eingeführt.

Definition 5.3. Sei α^* ein Fixpunkt der β -Funktion im \mathbb{R}^N und sei β in α^* zweimal stetig differenzierbar. Die Matrix

$$\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} := \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_j} \right)_{1 \leq i, j \leq N} \quad (26)$$

heißt *Stabilitätsmatrix der β -Funktion* [10]. Ausgewertet am Punkt α^* ist die Schreibweise $\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha^*}$ oder kurz $\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_*$.

Ein Fixpunkt α^* heißt *hyperbolisch*, wenn alle Eigenwerte von $\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_*$ einen von Null verschiedenen Realteil besitzen [19].

Der Zusammenhang zu der Stabilität des Fixpunktes ist folgendermaßen zu erkennen.

In der Nähe eines hyperbolischen Fixpunktes α^* kann Gleichung (25) durch ihre Linearisierung beschrieben werden. Da bei einem hyperbolischen Fixpunkt die Eigenvektoren $\{e_i\}$ der Stabilitätsmatrix eine Basis sind, kann $(\alpha(t) - \alpha^*)$ in Eigenvektoren zerlegt werden,

$$\frac{d}{dt} \alpha(t) \simeq \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* (\alpha(t) - \alpha^*) = \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* \sum_{i=1}^N K_i(t) e_i \quad . \quad (27)$$

Für die Koeffizienten $\{K_i\}$ in der Basis der Eigenvektoren ergibt sich das entkoppelte DGL-System

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N K_i(t) e_i + \alpha^* \right) = \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* \sum_{i=1}^N K_i(t) e_i \quad (28)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d}{dt} K_i(t) = K_i(t) \lambda_i \quad (29)$$

$$\Rightarrow K_i(t) = e^{\lambda_i t} K_i(0) \quad , \quad (30)$$

wobei λ_i der Eigenwert zu e_i ist. Damit kann das Verhalten der Kopplungskonstante durch

$$\alpha(t) = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i t} K_i(0) e_i + \alpha^* \quad (31)$$

beschrieben werden. Dieses Ergebnis ist unter anderem in [17], [10] und [13] zu sehen. Aus Gleichung (31) wird dann klar, dass der Untervektorraum, der durch die Eigenvektoren $\{e_i\}$ mit $\Re \lambda_i < 0$ die Punkte in der Fixpunktumgebung enthält, die für $t \rightarrow \infty$ in den Fixpunkt hineinlaufen, entsprechend enthält der Untervektorraum mit Eigenvektoren zu $\Re \lambda_i > 0$ alle Punkte, die den Fixpunkt für $t \rightarrow -\infty$ erreichen beziehungsweise aus ihm herauslaufen. Alle weiteren Punkte der Fixpunktumgebung liegen auf Trajektorien, die den Fixpunkt nicht enthalten.

Ein Eigenvektor mit positivem Eigenwert wird oft auch als IR-attraktiv, mit einem negativen Eigenwert als IR-repulsiv bezeichnet [17]. Da in dieser Arbeit jedoch das UV-Verhalten von Interesse ist, werden die folgenden Bezeichnungen verwendet.

1. Ein Fixpunkt heißt *attraktiver (UV-)Fixpunkt*, wenn $\Re \lambda_i < 0 \forall i$.
2. Ein Fixpunkt heißt *repulsiver (UV-)Fixpunkt*, wenn $\Re \lambda_i > 0 \forall i$.
3. Falls ein Fixpunkt weder attraktiv noch repulsiv ist, d.h. wenn es sowohl Trajektorien gibt die in ihn hinein-, als auch welche die hinauslaufen, wird er *Sattelpunkt* genannt.
4. Die Menge der in den Fixpunkt hineinlaufenden Kurven heißt *kritische (UV-)Hyperfläche* M_c (critical manifold) des Fixpunktes.

Bei allgemeinen Betrachtungen (vgl. [17]) wird der nicht-hyperbolische Fall $\lambda_i = 0$ oft als unwichtiger Sonderfall nicht weiter betrachtet. Bei der Untersuchung einer konkreten β -Funktion kommt dieser Sonderfall aber auf natürliche Weise zu Stande, sobald ein Fixpunkt einen Wert $\alpha_i^* = 0$ besitzt. In diesem Fall ist es schwierig allgemeine Aussagen zu treffen, für ein 2-dimensionales Problem wie in Abschnitt 6 lässt sich jedoch ein alternatives Stabilitätskriterium finden.

Während die β -Funktion als DGL-System aus dem erzeugenden Funktional und somit letztlich aus der postulierten Lagrangedichte hervorgeht, ist die Bestimmung der Trajektorie⁶, die den Kopplungskonstanten „unserer Welt“ entspricht eine rein experimentelle Aufgabe.

⁶Genauer muss nur ein Punkt $\alpha(t_0)$ als Anfangswert des DGL-Systems bekannt sein.

5.3 Laufende Kopplungen im Standardmodell

Die Eichkopplungen der Starken, Schwachen und Elektromagnetischen Wechselwirkung
[2]

5.3.1 QED

5.3.2 QCD

6 β -Funktion im \mathbb{R}^2

Um 2-dimensionale autonome DGL-Systeme zu veranschaulichen eignet sich das Bild des Kopplungskonstanten-Flusses. Dabei „fließt“ ein Anfangswert $\alpha(t_0)$ mit Geschwindigkeit und Richtung $\dot{\alpha}(t) = \beta(\alpha(t))$ entlang einer Trajektorie durch den Phasenraum. Der Satz von Picard-Lindelöf stellt dabei sicher, dass sich zwei Trajektorien nicht schneiden. Ein Flussdiagramm wie in Abbildung 1 zeigt das Verhalten von $\alpha(t)$ indem das Geschwindigkeitsfeld β durch Pfeile im Phasenraum dargestellt wird.

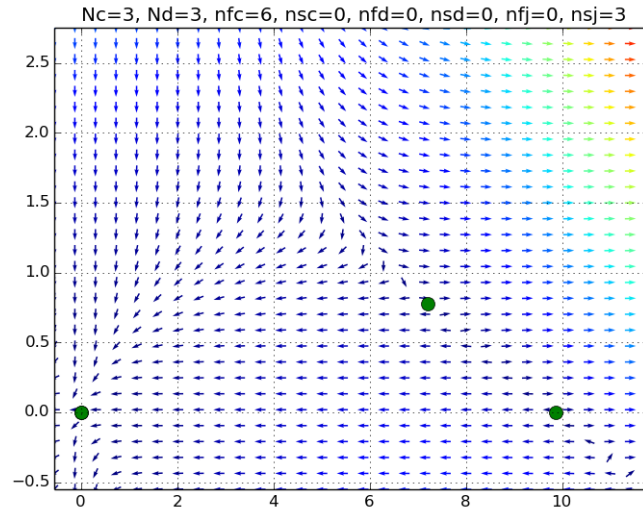


Abbildung 1: Ein Flussdiagramm für $\beta(\alpha_1, \alpha_2)$.

6.1 Stabilitätsbedingungen

Für ein System mit zwei Kopplungskonstanten vereinfacht sich die Untersuchung erheblich, da der Phasenraum der \mathbb{R}^2 ist und, wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, die Stabilitätsmatrix allgemein die Form

$$\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \begin{pmatrix} \sum_{i=2, j=0} i \alpha_1^{i-1} \alpha_2^j X_{ij}^1 & \sum_{i=2, j=1} j \alpha_1^i \alpha_2^{j-1} X_{ij}^1 \\ \sum_{i=1, j=2} i \alpha_1^{i-1} \alpha_2^j X_{ij}^2 & \sum_{i=0, j=2} j \alpha_1^i \alpha_2^{j-1} X_{ij}^2 \end{pmatrix} \quad (32)$$

annimmt. Die Eigenwerte von $\frac{\partial \beta}{\partial \alpha}$ können explizit als

$$\lambda_{+/-} = \frac{1}{2} \text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \pm \sqrt{\left(\frac{\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}}{2} \right)^2 - \text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}} \quad (33)$$

angegeben werden. Es wird nun kurz begründet, warum ein vollständig wechselwirkender Fixpunkt im allgemeinen als hyperbolisch angenommen werden darf, danach wird gezeigt, dass teilweise wechselwirkende Fixpunkte für beliebig hohe Ordnung nicht-hyperbolisch sind. Im 2-dimensionalen lässt sich jedoch ein alternatives Stabilitätskriterium für solche Fixpunkte finden.

6.1.1 hyperbolischer Fixpunkt

Sind $\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}$ und $\text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}$ nicht Null, lässt sich das Vorzeichen der Eigenwerte leicht Nachrechnen, das Ergebnis ist in Tabelle 1 zu sehen.

$\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}$	$\text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha}$	$\Re \lambda_+$	$\Re \lambda_-$	UV-Verhalten
> 0	> 0	> 0	> 0	repulsiv
< 0	> 0	< 0	< 0	attraktiv
$-$	< 0	> 0	< 0	Sattelpunkt

Tabelle 1: Das UV-Verhalten hyperbolischer Fixpunkte für $\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \neq 0$ und $\text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \neq 0$.

Da man in der Reihenentwicklung der β -Funktion davon ausgeht, dass höhere Ordnungen vernachlässigbar klein werden, kann man davon ausgehen, dass hyperbolische Fixpunkte der Ordnung n auch für höhere Ordnungen hyperbolisch bleiben. Falls ein vollständig wechselwirkender Fixpunkt ($\alpha_1^* \neq 0, \alpha_2^* \neq 0$) in Ordnung n entweder $\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* = 0$ oder $\text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* = 0$ ergibt, kann man davon ausgehen, dass sich die Koeffizienten X_{ij}^k zufällig aufheben und der Fixpunkt in höherer Ordnung wieder hyperbolisch wird. Vollständig wechselwirkende nicht-hyperbolische Fixpunkte können also als Folge einer zu groben Berechnung der β -Funktion verstanden werden. Es ist nicht klar, ob der Eigenvektor e_i zum Eigenwert $\lambda_i = 0$ eine UV-attraktiven oder repulsiven Richtung entspricht, da sich dies jedoch direkt auf die Dimension der kritischen Hyperfläche auswirkt ist die Untersuchung solcher Fixpunkte nur bedingt sinnvoll.

6.1.2 nicht-hyperbolischer Fixpunkt

Ein teilweise wechselwirkender Fixpunkt, o.E. $\alpha^* = (\alpha_1^*, 0)$, führt zu der Stabilitätsmatrix

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \right|_* = \begin{pmatrix} \sum_{i=2} i(\alpha_1^*)^{i-1} X_{i0}^1 & \sum_{i=2} (\alpha_1^*)^i X_{i1}^1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} . \quad (34)$$

mit den Eigenvektoren und Eigenwerten

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} , \quad e_2 \propto \begin{pmatrix} -\sum_{i=2} (\alpha_1^*)^i X_{i1}^1 \\ \sum_{i=2} i(\alpha_1^*)^{i-1} X_{i0}^1 \end{pmatrix} , \quad \lambda_1 = \sum_{i=2} i(\alpha_1^*)^{i-1} X_{i0}^1 , \quad \lambda_2 = 0 . \quad (35)$$

Da in β_2 die Variable α_2 in jedem Monom mindestens zur zweiten Potenz auftaucht, ist dies für beliebig hohe Ordnung zu erwarten, sodass hier ein alternatives Kriterium für das UV-Verhalten des Fixpunktes gefunden werden muss.

Zunächst wird (27) um die zweite Ordnung der Taylorentwicklung ergänzt,

$$\beta_i(\alpha) \simeq \sum_{m=1}^2 \left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_m} \right|_* (\alpha_m - \alpha_m^*) + \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^2 (\alpha_m - \alpha_m^*) \left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \alpha_m \partial \alpha_n} \right|_* (\alpha_n - \alpha_n^*) . \quad (36)$$

Wie in Abschnitt 5.2 wird diese Gleichung in der Eigenbasis der Stabilitätsmatrix geschrieben

$$\dot{K}_1(t) e_1^i + \dot{K}_2(t) e_2^i = \sum_{k,m=1}^2 K_k(t) \frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_m} e_k^m + \frac{1}{2} \sum_{k,l,m,n=1}^2 K_k(t) K_l(t) \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \alpha_m \partial \alpha_n} e_k^m e_l^n \quad (37)$$

$$= K_1(t) \lambda_1 e_1^i + \frac{1}{2} \sum_{k,l,m,n=1}^2 K_k(t) K_l(t) \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \alpha_m \partial \alpha_n} e_k^m e_l^n . \quad (38)$$

Die Indizes k und l laufen dabei für die zwei Eigenvektoren, während m , n und i für die Komponente eines Vektors stehen. Der Koeffizientenvergleich in e_1 führt in erster Ordnung zum gleichen Ergebnis wie beim hyperbolischen Fixpunkt. Auf der kritischen Hyperfläche gilt demnach $\lambda_1 < 0 \Rightarrow K_1(t) \rightarrow 0$ für t groß, oder $\lambda > 0 \Rightarrow K_1(t) \equiv 0$, da der Fixpunkt sonst nicht erreicht wird. Für große t wird (38) damit zu

$$\dot{K}_2(t) e_2^i = \frac{1}{2} K_2(t)^2 \sum_{m,n=1}^2 \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \alpha_m \partial \alpha_n} e_2^m e_2^n \quad (39)$$

$$= \frac{1}{2} K_2(t)^2 \sum_{m,n=1}^2 \left[\left(e_2^m \frac{\partial}{\partial \alpha_m} \right) \left(e_2^n \frac{\partial}{\partial \alpha_n} \right) - e_2^m \frac{\partial e_2^n}{\partial \alpha_m} \frac{\partial}{\partial \alpha_m} \right]_* \beta_i \quad (40)$$

$$= \frac{1}{2} K_2(t)^2 \left[\sum_{m=1}^2 e_2^m \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_m} e_2^i - \sum_{m,n=1}^2 e_2^m \frac{\partial e_2^n}{\partial \alpha_m} \frac{\partial}{\partial \alpha_n} \beta_i \right]_* . \quad (41)$$

Für $i = 2$ kann eine Lösung wie folgt gefunden werden. Der zweite Term in (41) ist wegen (34) gleich Null. Aus (33) und (32) erhält man am Fixpunkt

$$\frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_q} = \frac{\partial}{\partial \alpha_q} \frac{\partial \beta_2}{\partial \alpha_2} - \frac{\partial \beta_1}{\partial \alpha_2} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial \alpha_1} \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \alpha_q} \frac{\partial \beta_2}{\partial \alpha_1} \quad \begin{cases} = 0 & \text{für } q = 1 \\ \neq 0 & \text{für } q = 2 \end{cases} . \quad (42)$$

Es bleibt

$$\dot{K}_2(t) = \frac{1}{2} K_2(t)^2 e_2^2 \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_2} \Big|_* \quad \text{mit der Lösung} \quad K_2(t) = \frac{2}{2K_2(0)^{-1} - e_2^2 \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_2} t} . \quad (43)$$

Da Eigenvektoren nur bis auf ein reelles Vielfaches bestimmt sind, kann $e_2^2 > 0$ gewählt werden. Damit $\alpha(t=0)$ physikalisch ist folgt $K_2(0) > 0$, und damit $K_2(t)$ für steigendes t keinen Pol passiert folgt

$$\frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_2} < 0 \quad (44)$$

als Bedingung für einen in e_2 -Richtung attraktiven Fixpunkt. Allgemein ist es nicht möglich, die DGL (41) mit $i = 1$ zu lösen, da der zweite Term in der Klammer keine einfachen aufweist. Da die DGL aber für jedes i einzeln gelten muss, muss jede Lösung mindestens (44) erfüllen, in der Praxis lässt sich jedoch tatsächlich feststellen, dass (44) die UV-Stabilität eines Fixpunktes exakt vorhersagt. Daher, und weil zu erwarten ist, dass höchstens endlich viele Lösungen (44) erfüllen, die nicht zu Trajektorien gehören, die in den Fixpunkt hineinlaufen, wird diese Bedingung im Folgenden weiter verwendet

6.2 Fixpunktextrapolation

Um das UV-Verhalten einer β -Funktion mit den bisher gemessenen Werten für die Kopplungskonstanten im SM vergleichen zu können, ist es notwendig die kritische Hyperfläche eines Fixpunktes auch in einem Bereich zu kennen, der zu groß für eine Taylorentwicklung geringer Ordnung ist. Das Auffinden der kritischen Hyperfläche ist insbesondere für höherdimensionale Probleme analytisch kaum möglich und daher eine numerische Aufgabe. Stehen nun n Messwerte an der selben Renormierungsskala μ_0 zur Verfügung und gibt es einen Punkt $\alpha_0 \in M_c$ der diese enthält, dann sind alle Kopplungskonstanten $\alpha(\mu)$ bis auf $(\dim(M_c) - n)$ freie Parameter festgelegt⁷ und laufen in den Fixpunkt hinein. Existiert so ein $\alpha_0 \in M_c$ nicht, kommt der untersuchte Fixpunkt für ein asymptotic safety Szenario nicht in Frage.

Ein besonderer Vorteil einer Erweiterung $G \rightarrow G_1 \times G_2$ ist die Möglichkeit einen UV-Fixpunkt eindeutig extrapolieren zu können, da die kritische Hyperfläche die Dimension

⁷Für $n \geq \dim(M_c)$ also eindeutig.

$\dim(\alpha^*) = 0$, $\dim(\text{Trajektorie}) = 1$ oder $\dim(\text{Phasenraum}) = 2$ hat. Im ersten Fall, $\dim M_c = 0$ besteht sie nur aus dem Fixpunkt selbst, dieser Fall ist also eher als eine mathematische, triviale Lösung zu betrachten, die keine physikalische Bedeutung im Sinne laufender Kopplungskonstanten hat. Im Fall $\dim M_c = 2$ besteht sie aus dem gesamten Phasenraum. Weil in diesem Fall jede Trajektorie in den Fixpunkt hineinläuft kann keine Vorhersage für die Größen der Kopplungskonstanten gemacht werden, dafür ist aber das UV-Verhalten von dem Startwert $(\alpha_1(t_0), \alpha_2(t_0))$ unabhängig. Der für die Extrapolation interessanteste Fall ist also $\dim M_c = 1$, da die UV-Hyperfläche dann aus zwei Trajektorien $s^{+/-} : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^2$ besteht⁸ und deshalb eindeutige Wertepaare $(\alpha_1(t), \alpha_2(t))$ vorhersagt. Wenn eine Kopplungskonstante (o.E.) $\alpha_1(t_0)$ bei einer Renormierungsskala t_0 bekannt ist, und unter der Annahme, dass der Fixpunkt für $t \rightarrow \infty$ erreicht wird, ist somit auch $\alpha_2(t_0)$ sowie das gesamte Verhalten beider Kopplungskonstanten bekannt.

Für die Extrapolation werden außerdem die folgende Beobachtungen ausgenutzt.

1. Eine Trajektorie, welche in einen Sattelpunkt hineinläuft, ist gleichzeitig eine Separatrix, d.h. sie teilt den Phasenraum in Gebiete mit qualitativ unterschiedlichem Verhalten für $t \rightarrow \infty$.
2. Ein Sattelpunkt und ein attraktiver Fixpunkt sind mit einer Trajektorie verbunden, ebenso ist ein Sattelpunkt mit einem repulsiven Fixpunkt mit einer Separatrix verbunden, sofern die Fixpunkte existieren und in der Nähe des Sattelpunktes liegen.

Da das gesuchte M_c folglich immer eine Separatrix ist, kann wie folgt verfahren werden. Zunächst werden zwei Gebiete L und R definiert, die zu qualitativ verschiedenen Trajektorien führen. Beispielsweise lassen sich oft Abschätzungen der Art finden: Wenn es ein t_1 gibt mit

$$\alpha_j(t_1) > \max \left\{ \alpha_j^{*i} \mid \text{alle Fixpunkte } \alpha^{*i} \right\} , \quad (45)$$

dann kann der gewünschte Fixpunkt nicht mehr für $t > t_1$ erreicht werden. Am Fixpunkt wird eine Orthonormalbasis $\{f_1, f_2\}$ gewählt⁹ und der Phasenraum in Ebenen mit Abstand ϵ eingeteilt, die nullte Ebene geht dabei durch den Fixpunkt. Rekursiv werden dann

$$s_n^{L/R} = s_{n-1}^{L/R} + \epsilon f_1 + d^{L/R} \delta f_2 \quad (46)$$

definiert. Für festes δ wird $d^{L/R}$ so eingestellt, dass die Trajektorie mit Anfangswert s_n^L in den Bereich L hineinläuft, analog für R . Mit $s_0^L := \alpha - \delta/2 f_2$ und $s_0^R := \alpha + \delta/2 f_2$ ergibt sich so ein Schlauch $(s_n^L, s_n^R)_{n=0,1,\dots}$ der Breite δ , der die Separatrix beinhaltet.

⁸Jeweils eine in, eine entgegen der Richtung des attraktiven Eigenvektors.

⁹Der Einfachheit halber kann die Basis aus Eigenvektoren oder die $\alpha_{1,2}$ -Achsen gewählt werden, sofern dies zu keinen numerischen Schwierigkeiten führt.

7 UV-Fixpunkte der $SU_{\text{QCD}} \times SU_{\text{dQCD}}$

Die allgemeinste Form der β -Funktion auf 2-loop Ordnung wurde von D.R.T. Jones berechnet [12]. Die β -Funktion hat die Form

$$\beta(g) = \left(X_1^g g_1^3 + Y_1^g g_1^5 + Z_1^g g_1^3 g_2^2 \right) \quad (47)$$

Für die Darstellungen R_1, R_2, S_1 und S_2 der Fermionen bzw. Skalare sind die Koeffizienten von β_1 gegeben durch

$$X_1^g = (16\pi^2)^{-1} \left[\frac{2}{3} T(R_1) d(R_2) + \frac{1}{3} T(S_1) d(S_2) - \frac{11}{3} C_2(G_1) \right] \quad (48)$$

$$Y_1^g = (16\pi^2)^{-2} \left[\left(\frac{10}{3} C_2(G_1) + 2C_2(R_1) \right) T(R_1) d(R_2) \right] \quad (49)$$

$$+ \left(\frac{2}{3} C_2(G_1) + 4C_2(S_1) \right) T(S_1) d(S_2) - \frac{34}{3} C_2(G_1)^2 \right] \quad (50)$$

$$Z_1^g = (16\pi^2)^{-2} [2C_2(R_2) d(R_2) T(R_1) + 4C_2(S_2) d(S_2) T(S_1)] \quad (51)$$

Die Berechnung ist dabei für chirale Fermionen geschehen, was einen zusätzlichen Faktor von 2 in $d(R_1)$ und $d(R_2)$ bewirkt, wenn man sonst Dirac-Fermionen betrachtet. Außerdem wurde bei der Berechnung dieselben Darstellungen R_1 und R_2 bzw. S_1 und S_2 bezüglich G_1 und G_2 für alle Fermionen bzw. Skalare angenommen. Wenn Teilchen des QCD-, dQCD- und joint-Sektors verschiedene Darstellungen besitzen, müssen $d(R_1)$, $d(R_2)$, $d(S_1)$ und $d(S_2)$ angepasst werden. Am einfachsten und anschaulichsten geschieht dies über das Zeichnen von Feynmandiagrammen und abzählen der möglichen Teilchen, die im entsprechenden Diagramm erlaubt sind.

Die ermittelten Koeffizienten stimmen mit denen in [6] überein. Mit $N_{f_c} := n_{f_c} + N_d n_{f_j}$, $N_{s_c} := n_{s_c} + N_d n_{s_j}$, $N_{f_d} := n_{f_d} + N_c n_{f_j}$ und $N_{s_d} := n_{s_d} + N_c n_{s_j}$ lassen sie sich schreiben als

$$X_1^g = (16\pi^2)^{-1} \left[\frac{2}{3} N_{f_c} + \frac{1}{6} N_{s_c} - \frac{11}{3} N_c \right] \quad (52)$$

$$Y_1^g = (16\pi^2)^{-2} \left[\left(\frac{13}{3} N_c - \frac{1}{N_c} \right) N_{f_c} + \left(\frac{4}{3} N_c - \frac{1}{N_c} \right) N_{s_c} - \frac{34}{3} N_c^2 \right] \quad (53)$$

$$Z_1^g = (16\pi^2)^{-2} \left[(N_d^2 - 1)(n_{f_j} + n_{s_j}) \right] \quad (54)$$

Da beide Kopplungskonstanten in einer 4-dimensionalen Raumzeit die Massendimension $[g_1] = [g_2] = 0$ besitzen, werden die neuen Kopplungskonstanten $\alpha_i := g_i^2/4\pi$ eingeführt. Die Bedingung $|g_i| < 1$ für eine sinnvolle Störungstheorie lässt sich zu $\alpha_i < 4\pi$ übersetzen.

Mit $X_i := 8\pi X_i^g$, $Y_i := 32\pi^2 Y_i^g$ und $Z_i := 32\pi^2 Z_i^g$ folgt

$$\beta(g) = \begin{pmatrix} X_1 \alpha_1^2 + Y_1 \alpha_1^3 + Z_1 \alpha_1^2 \alpha_2 \\ X_2 \alpha_2^2 + Y_2 \alpha_2^3 + Z_2 \alpha_1 \alpha_2^2 \end{pmatrix} \quad (55)$$

und als Nullstellen findet man die Fixpunkte

$$\alpha^{*1} = (0, 0) \quad \alpha^{*2} = \left(0, -\frac{X_2}{Y_2}\right) \quad \alpha^{*3} = \left(-\frac{X_1}{Y_1}, 0\right) \quad \alpha^{*4} = \left(\frac{Z_1 X_2 - X_1 Y_2}{Y_1 Y_2 - Z_1 Z_2}, \frac{Z_2 X_1 - X_2 Y_1}{Y_1 Y_2 - Z_1 Z_2}\right) \quad (56)$$

An den Fixpunkten gilt außerdem

$$\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* = (\alpha_1^*)^2 Y_1 + (\alpha_2^*)^2 Y_2 \quad \text{sowie} \quad \text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* = (\alpha_1^* \alpha_2^*)^2 (Y_1 Y_2 - Z_1 Z_2) \quad (57)$$

7.1 UV-Verhalten bei α^{*4}

7.1.1 attraktiver Fixpunkt

Für komplett UV-attraktives Verhalten müssen die Bedingungen

$$\alpha_1^* > 0 \quad \wedge \quad \alpha_2^* > 0 \quad \wedge \quad \text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* > 0 \quad \wedge \quad \text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* < 0 \quad (58)$$

erfüllt sein, man kann jedoch zeigen, dass diese Bedingungen für die gewählte Darstellung nicht gleichzeitig wahr sein können. Dazu werden sie zunächst in den Koeffizienten geschrieben und mit (57) verglichen. Es bietet sich an, eine Fallunterscheidung in den Vorzeichen von Y_1 und Y_2 zu machen. Es folgt

1. $Y_1 > 0 \wedge Y_2 > 0$: Dann ist $\text{Sp} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* < 0$ nicht möglich.
2. $Y_1 < 0 \wedge Y_2 < 0$: Für einen physikalischen Fixpunkt muss

$$Z_1 X_2 > X_1 Y_2 \quad \wedge \quad Z_2 X_1 > Y_1 X_2 \quad (59)$$

Wie an (54) zu sehen ist, müssen beide $Z_i > 0$ sein, dann folgt, dass $X_i > 0$ ist. Die Rechnung ohne Skalare ergibt

$$X_1 > 0 \stackrel{(52)}{\Rightarrow} N_{fc} > \frac{11}{2} N_c \quad \wedge \quad Y_1 < 0 \stackrel{(53)}{\Rightarrow} N_{fc} < \frac{34}{13 - \frac{3}{N_c^2}} N_c \quad (60)$$

$$\Rightarrow \frac{11}{2} < \frac{34}{13 - \frac{3}{N_c^2}} \quad \text{!} \quad (61)$$

Das Einführen von Skalaren begünstigt $X_1 > 0$, ist aber mathematisch nur für $N_c = 1$ oder $N_d = 1$ möglich. Da die $SU(1)$ die Multiplikation mit Eins ist, ist dieser Fall uninteressant.

$$N_{f_c} > \frac{11}{2}N_c - \frac{1}{4}N_{s_c} \quad \wedge \quad N_{f_c} < \left[\frac{34}{3}N_c^2 - \left(\frac{4}{3}N_c - \frac{1}{N_c} \right) N_{s_c} \right] \left(\frac{13}{3}N_c - \frac{1}{N_c} \right)^{-1} \quad (62)$$

$$\Rightarrow \left[\left(\frac{4}{3}N_c - \frac{1}{N_c} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{13}{3}N_c - \frac{1}{N_c} \right) \right] N_{s_c} < \frac{34}{3}N_c^2 - \frac{11}{2}N_c \left(\frac{13}{3}N_c - \frac{1}{N_c} \right) \quad (63)$$

Für $N_c = 1$ folgt die untere Grenze $N_{s_c} \geq 14$, für $N_c \geq 2$ die obere Grenze $N_{s_c} \lesssim -200$, es gibt also keine physikalisch sinnvolle Lösung.

3. Y_1 und Y_2 haben verschiedene Vorzeichen: Damit $\text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* > 0$ ist muss es ein $Z_i < 0$ geben, was in der gewählten Darstellung (54) nicht möglich ist.

Für Fermionen und Skalare in der fundamentalen Darstellung der $SU(N_c) \times SU(N_d)$ muss demnach $\dim M_c \leq 1$.

7.1.2 Sattelpunkt

Am physikalischen Sattelpunkt muss gelten

$$\alpha_1^* > 0 \quad \wedge \quad \alpha_2^* > 0 \quad \wedge \quad \text{Det} \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \Big|_* < 0 \quad , \quad (64)$$

in Koeffizienten ausgedrückt bedeutet das

$$Z_1 X_2 < X_1 Y_2 \quad \wedge \quad Z_2 X_1 < X_2 Y_1 \quad \wedge \quad Z_1 Z_2 > Y_1 Y_2 \quad . \quad (65)$$

Da es für den Sattelpunkt weniger Bedingungen als für einen UV-attraktiven Fixpunkt gibt, sind Fallunterscheidungen in den Vorzeichen von Y_i und X_i nötig. Es wird sich zeigen, dass nur Fälle mit $X_1 < 0 \wedge X_2 < 0$ möglich sind, sodass es obere Schranken für die Teilchenzahlen und N_d gibt.

1. $Y_1 > 0 \wedge Y_2 > 0$:

a) $X_1 > 0 \wedge X_2 > 0$: Aus (65) folgt

$$Z_1 < \frac{X_1}{X_2} Y_2 \quad \wedge \quad Z_2 < \frac{X_2}{X_1} Y_1 \quad \wedge \quad Z_1 Z_2 > Y_1 Y_2 \quad (66)$$

was jedoch nicht gleichzeitig möglich ist.

- b) $X_1 < 0 \wedge X_2 < 0$: Man erhält obere Begrenzungen für die Anzahl der joint-Fermionen

$$n_{f_c} + N_d n_{f_j} < N_c \quad \wedge \quad c \leftrightarrow d \quad (67)$$

$$\Rightarrow n_{f_j}^2 + n_{f_j} \frac{n_{f_d}}{N_c} + \frac{11}{2} \frac{n_{f_c}}{N_c} < \left(\frac{11}{2}\right)^2 \quad \wedge \quad c \leftrightarrow d \quad . \quad (68)$$

Es gibt also eine allgemeine Obergrenze von $n_{f_j} < \frac{11}{2}$, die für die Grenzfälle $n_{f_c} = 0$ und $n_{f_d} = 0$ oder $N_c \rightarrow \infty$ und gleichzeitig $N_d \rightarrow \infty$ erreicht wird. Die einzigen Standardmodell nahen Lösungen, die gleichzeitig zu sinnvollen Fixpunkten führen, sind

$$N_c = 3 \quad N_d = 2 \quad n_{f_c} = 6 \quad 0 \leq n_{f_d} \leq 2 \quad n_{f_j} = 1 \quad , \quad (69)$$

weitere Lösungen gibt es nur für $n_{f_c} < 6$ oder $N_c > 3$.

- c) $X_1 < 0 \wedge X_2 > 0$: Dann müsste

$$\underbrace{Z_1 X_2}_{>0} < \underbrace{X_1 Y_2}_{<0} \quad \not\leq \quad , \quad (70)$$

dieser Fall kommt für physikalische Fixpunkte also nicht in Frage.

2. $Y_1 > 0 \wedge Y_2 < 0$:

- a) $X_2 > 0$: Wie schon gezeigt ist $Y_2 < 0 \wedge X_2 > 0$ nicht möglich.

- b) $X_1 > 0 \wedge X_2 < 0$: Es kommt direkt zum Widerspruch,

$$\underbrace{Z_2 X_1}_{>0} < \underbrace{X_2 Y_1}_{<0} \quad \not\leq \quad . \quad (71)$$

- c) $X_1 < 0 \wedge X_2 < 0$: Auch hier erhält man eine Begrenzung für n_{f_j}

$$n_{f_c} + N_d n_{f_j} < \frac{34}{13 - \frac{3}{N_c^2}} N_c \quad \wedge \quad n_{f_d} + N_c n_{f_j} < \frac{11}{2} N_d \quad (72)$$

$$\Rightarrow n_{f_j} < \sqrt{\frac{11}{2} \frac{34}{13 - \frac{3}{N_c^2}}} \lesssim 3.9 \quad . \quad (73)$$

Gleichzeitige Lösungen zu (65) mit $N_c = 3$ und $n_{f_c} \geq 6$ gibt es nicht.

3. $Y_1 < 0 \wedge Y_2 < 0$:

- a) Ein $X_i > 0$: Wieder ist $Y_i < 0 \wedge X_i > 0$ nicht möglich.
- b) $X_1 < 0 \wedge X_2 < 0$: Hier folgt

$$n_{f_c} + N_d n_{f_j} < \frac{34}{13 - \frac{3}{N_c^2}} \quad \wedge \quad c \leftrightarrow d \quad (74)$$

$$\Rightarrow n_{f_j} < \frac{34}{\sqrt{\left(13 - \frac{1}{N_c^2}\right)\left(13 - \frac{1}{N_c^2}\right)}} \lesssim 2.7 \quad . \quad (75)$$

Auch hier gibt es keine Lösungen, die nahe am SM sind.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass es in allen Fällen Obergrenzen $n_{f_j} \lesssim 5$ für die Anzahl der joint-Fermionen gibt, und durch das Einführen von QCD- und dQCD-Fermionen wird diese Grenze weiter nach unten verschoben. Der einzige Fall, der in der skalarfreien Theorie physikalische Sattelpunkte bringt, ist 1b, exemplarisch ist das Flussdiagramm für $n_{f_j} = 2$ in Abbildung 2 zu sehen. Alle drei Fixpunkte liegen, wie in Tabelle 2 zu sehen, weit im nicht-perturbativen Bereich. Nicht-perturbative $SU(N)$ Dynamiken können in einem Veneziano-limit störungstheoretisch behandelt werden [11][13], dabei wird der Grenzfall $N \rightarrow \infty, N_f \rightarrow \infty, N/N_f < \infty, g^2 N \rightarrow 0$ betrachtet [16]. Wie im Folgenden gezeigt wird, ist es mit Skalaren jedoch möglich perturbative Fixpunkte zu erhalten, ohne von den Standardmodell Werten $N_c = 3$ und $n_{f_c} = 6$ abweichen zu müssen.

n_{f_d}	0	1	2
α^{*4}	(166.6, 60.8)	(69.3, 39.1)	(22.4, 28.7)

Tabelle 2: Lage des Sattelpunktes α^{*4} ohne Skalare.

An den Koeffizienten (52) und (53) sieht man, dass Skalare qualitativ den gleichen Einfluss auf die β -Funktion wie Fermionen haben, jedoch um einen Faktor 3-4 kleiner, es ist also zu erwarten, dass die Grenzen für die Anzahl der joint-Skalare um einen entsprechenden Faktor höher liegen. Einige mögliche Standardmodell nahe Teilchenzahlen sind in Tabelle 3 zu sehen. In Abbildung 3 ist außerdem der Fixpunkt α^{*4} für $1 \leq n_{s_d} \leq 5$ und sinnvolle n_{s_j} dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass α^{*4} betragsmäßig kleiner wird, je mehr joint-Skalare eingeführt werden.

Um einen vollständig wechselwirkenden UV-Fixpunkt zu erhalten, der mit Methoden der Störungstheorie behandelt werden kann, ist es demnach nötig, skalare Teilchen im joint-Sektor einzuführen. Die Teilchen des dQCD-Sektors haben dagegen, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, nur geringe Auswirkungen auf die Lage des Fixpunktes, ob hier Fermionen, Skalare oder beide Teilchensorten eingeführt werden ist qualitativ nicht entscheidend.

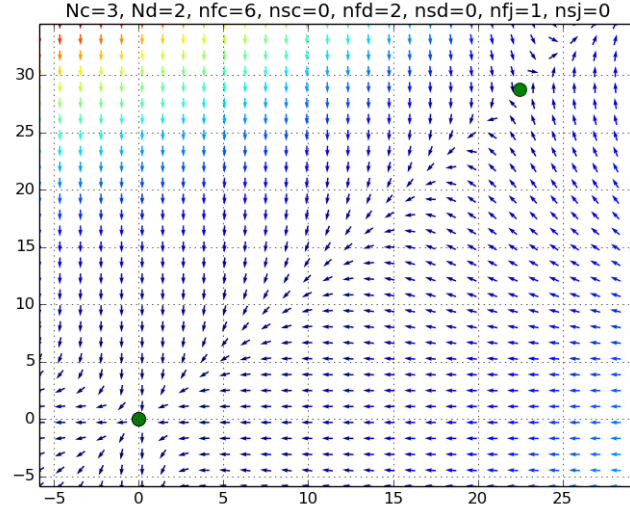


Abbildung 2: Flussdiagramm für den Sattelpunkt α^{*4} .

N_d	n_{s_j}	n_{s_d}		N_d	n_{s_j}	n_{s_d}		N_d	n_{s_j}	n_{s_d}
2	1	18		3	1	24-26		4	1	31-36
2	2	12-16		3	2	5-25		4	2	0-37
2	3	0-14		3	3	0-25		5	1	37-46
2	4	0-12		3	4	1-24		6	1	41-57
2	5	0-10		3	5	14-23		7	1	0-69
2	6	0-7		3	6	20-23				
2	7	0-5		3	7	22				
2	8	0-3								
2	9	0-1								

Tabelle 3: Mögliche Anzahlen von Skalaren für $N_c = 3, n_{fc} = 6, n_{fd} = 0$.

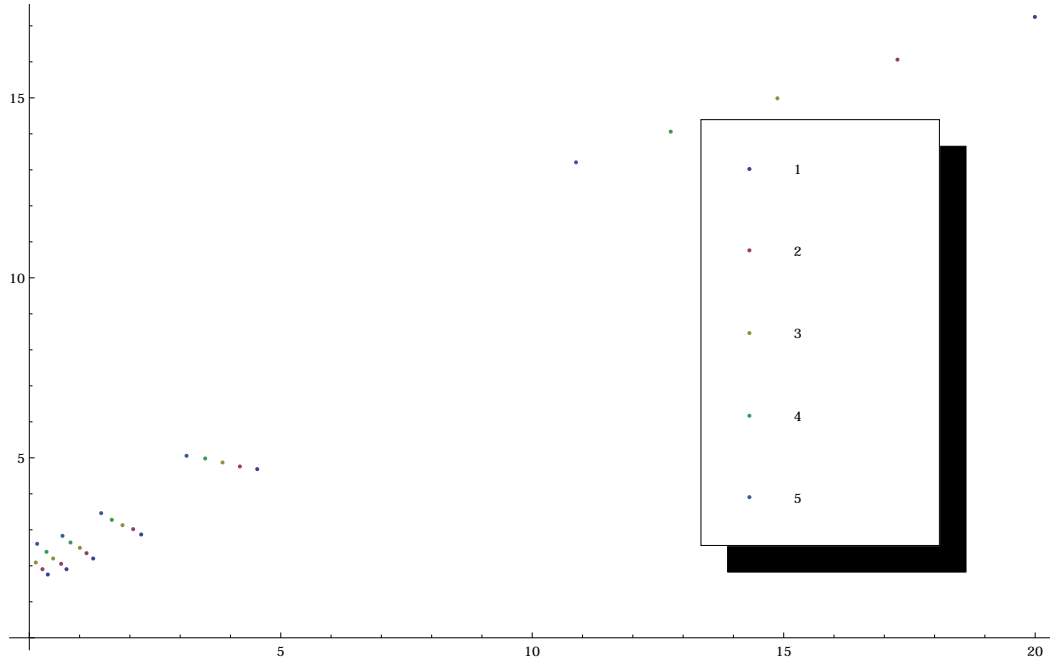


Abbildung 3: Flussdiagramm für den Sattelpunkt α^{*4} .

7.2 UV-Verhalten bei α^{*3}

Da der Fixpunkt $\alpha^{*3} = (-X_1 Y_1^{-1}, 0)$ ein teilweise wechselwirkender Fixpunkt ist, muss hier das in 6.1.2 beschriebene Stabilitätskriterium angewendet werden. Zunächst kann aber einfach gezeigt werden, dass dieser Fixpunkt nicht in jede Richtung UV-attraktiv sein kann.

Damit $\alpha_1^{*3} = -X_1 Y_1^{-1} > 0$, muss $X_1 < 0$ und $Y_1 > 0$. Es wurde in 7.1.1 gezeigt, dass die umgekehrte Vorzeichenwahl physikalisch nicht sinnvoll ist. Gleichung (34) zeigt nun $\lambda_1 = (\alpha_1^*)^2 Y_1 > 0$ zu $e_1 = (1, 0)^T$, folglich muss die α_1 -Achse UV-repulsiv bezüglich α^{*3} sein.

Am Fixpunkt ergibt sich aus (34) und (33)

$$\lambda_2 = 0 \quad , \quad e_2 = \begin{pmatrix} -Z_1 Y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_2} = 2X_2 - 2\frac{X_1}{Y_1} Z_2 \quad . \quad (76)$$

Die Bedingung dafür, dass α^{*3} ein Sattelpunkt ist, ist somit

$$X_1 < 0 \quad \wedge \quad Y_1 > 0 \quad \wedge \quad X_2 Y_1 < Z_2 X_1 \quad . \quad (77)$$

Da die Vorzeichen $X_1 < 0$, $Y_1 > 0$ und $X_2 < 0$ festgelegt sind, kann bereits ohne Fallunterscheidung eine Grenze gefunden werden. Aus $X_1 < 0 \wedge X_2 < 0$ folgt allgemein (vgl. (1b))

$$\left(n_{f_j} + \frac{1}{4}n_{s_j}\right)^2 + \left(n_{f_j} + \frac{1}{4}n_{s_j}\right)\left(n_{f_d} + \frac{1}{4}n_{s_d}\right)\frac{1}{N_c} + \frac{11}{2}\left(n_{f_c} + \frac{1}{4}n_{s_c}\right)\frac{1}{N_c} < \left(\frac{11}{2}\right)^2 \quad \wedge \quad c \leftrightarrow d \quad . \quad (78)$$

Zunächst werden wieder nur Fermionen betrachtet. Da sie außreichen, um perturbative Fixpunkte zu modellieren, wird es nicht nötig sein, Skalare einzuführen. Aus (78) und $X_1 < 0$ folgen allgemeine Grenzen für n_{f_j} , N_d und n_{f_d}

$$\begin{aligned} n_{f_j} &< \sqrt{\left(\frac{11}{2}\right)^2 - \frac{11}{2}\frac{n_{f_c}}{N_c}} = 4.39 \quad , \quad n_{f_d} < \left(\left(\frac{11}{2}\right)^2 - 1\right)N_c - \frac{11}{2}n_{f_c} = 54.75 \quad , \\ N_d &< \frac{11}{2}N_c - n_{f_c} = 10.5 \end{aligned} \quad (79)$$

für $N_c = 3$ und $n_{f_c} = 6$. Tabelle 5 zeigt die möglichen Teilchenanzahlen und die Komponen-

N_d	n_{f_j}	n_{f_d}	α_1^{*3}	N_d	n_{f_j}	n_{f_d}	α_1^{*3}
2	2	0	2.21	6	1	0-29	0.75
3	1	0-8	5.24	7	1	0-35	0.47
3	2	0-9	0.85	8	1	0-40	0.28
3	3	0-7	0.14	9	1	0-46	0.14
4	1	0-16	2.21	10	1	0-51	0.04
4	2	0-15	0.28				
5	1	0-23	1.23				
5	2	0-21	0.04				

Tabelle 4: Mögliche Teilchenzahlen für einen Sattelpunkt bei α^{*3} , mit $N_c = 3$, $n_{f_c} = 6$ und ohne Skalare.

te α_1^{*3} . Im Gegensatz zum vollständig wechselwirkenden Fixpunkt α^{*4} ist α^{*3} auch für eine Theorie ohne Skalare in einem perturbativ sinnvollen Bereich, demnach können hier zwar wieder Skalare eingeführt werden, ein neues Verhalten oder neue Wertebereiche für den Fixpunkt treten aber nicht auf.

7.3 UV-Verhalten bei α^{*2}

Aufgrund der Symmetrie der β -Funktion in den Indizes c und d ist das allgemeine Vorgehen wie bei α^{*3} . Der Fixpunkt ist in α_2 -Richtung repulsiv, das Kriterium für einen

N_d	n_{f_j}	n_{f_d}		N_d	n_{f_j}	n_{f_d}
2	1	3-7		5	1	13-24
2	2	1-4		5	2	19-21
2	3	0-1		6	1	17-29
3	1	6-13		7	1	22-35
3	2	4-10		8	1	28-40
3	3	4-7		9	1	36-46
4	1	9-18		10	1	47-51
4	2	10-15				

Tabelle 5: Mögliche Teilchenzahlen für einen Sattelpunkt bei α^{*2} , mit $N_c = 3$, $n_{f_c} = 6$ und ohne Skalare.

Sattelpunkt ist analog zu (77) als

$$X_2 < 0 \quad \wedge \quad Y_2 > 0 \quad \wedge \quad X_1 Y_2 < Z_1 X_2 \quad . \quad (80)$$

Literatur

- [1] Dark matter. K.A. Olive et al. (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*, 38, 090001 (2014) and 2015 update.
- [2] Quantum chromodynamics. K.A. Olive et al. (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*, 38, 090001 (2014) and 2015 update.
- [3] Georges Aad et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett.*, B716:1–29, 2012.
- [4] B. P. Abbott et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116(6):061102, 2016.
- [5] P. A. R. Ade et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. 2015.
- [6] Y. Bai and P. Schwaller. Scale of dark qcd. *Phys. Rev. D*, 89:063522, Mar 2014.
- [7] R. K. Ellis, W. J. Stirling, and B. R. Webber. *QCD and Collider Physics*. Cambridge University Press, 1996. Cambridge Books Online.
- [8] S.W. Hawking and W. Israel. *General Relativity; an Einstein Centenary Survey*. Cambridge University Press, 1979.
- [9] S.W. Hawking and W. Israel. *General Relativity; an Einstein Centenary Survey*. Cambridge University Press, 1979.
- [10] S.W. Hawking and W. Israel. *General Relativity; an Einstein Centenary Survey*. Cambridge University Press, 1979.
- [11] Matti Jarvinen and Elias Kiritsis. Holographic Models for QCD in the Veneziano Limit. *JHEP*, 03:002, 2012.
- [12] D. R. T. Jones. Two-loop β function for a $G_1 \times G_2$ gauge theory. *Phys. Rev. D*, 25:581–582, Jan 1982.
- [13] D. F. Litim and F. Sannino. Asymptotic safety guaranteed. *arXiv*, Jun 2014.
- [14] Axel Maas and Tajdar Mufti. Correlation Functions and Confinement in Scalar QCD. *PoS*, QCD-TNT-III:024, 2013. [PoSEPS-HEP2013,022(2013)].

- [15] M.D. Schwartz. *Quantum Field Theory and the Standard Model*. Quantum Field Theory and the Standard Model. Cambridge University Press, 2014.
- [16] G. Veneziano. U(1) without instantons. *Nuclear Physics B*, 159(1):213 – 224, 1979.
- [17] S. Weinberg. Critical phenomena for field theorists. 1976.
- [18] Steven Weinberg. *The Quantum Theory of Fields*, volume 2. Cambridge University Press, 1996. Cambridge Books Online.
- [19] E. Zeidler. Springer-handbuch der mathematik iv. 2013.
- [20] J. Zinn-Justin. *Quantum Field Theory and Critical Phenomena*. International series of monographs on physics. Clarendon Press, 1993.