

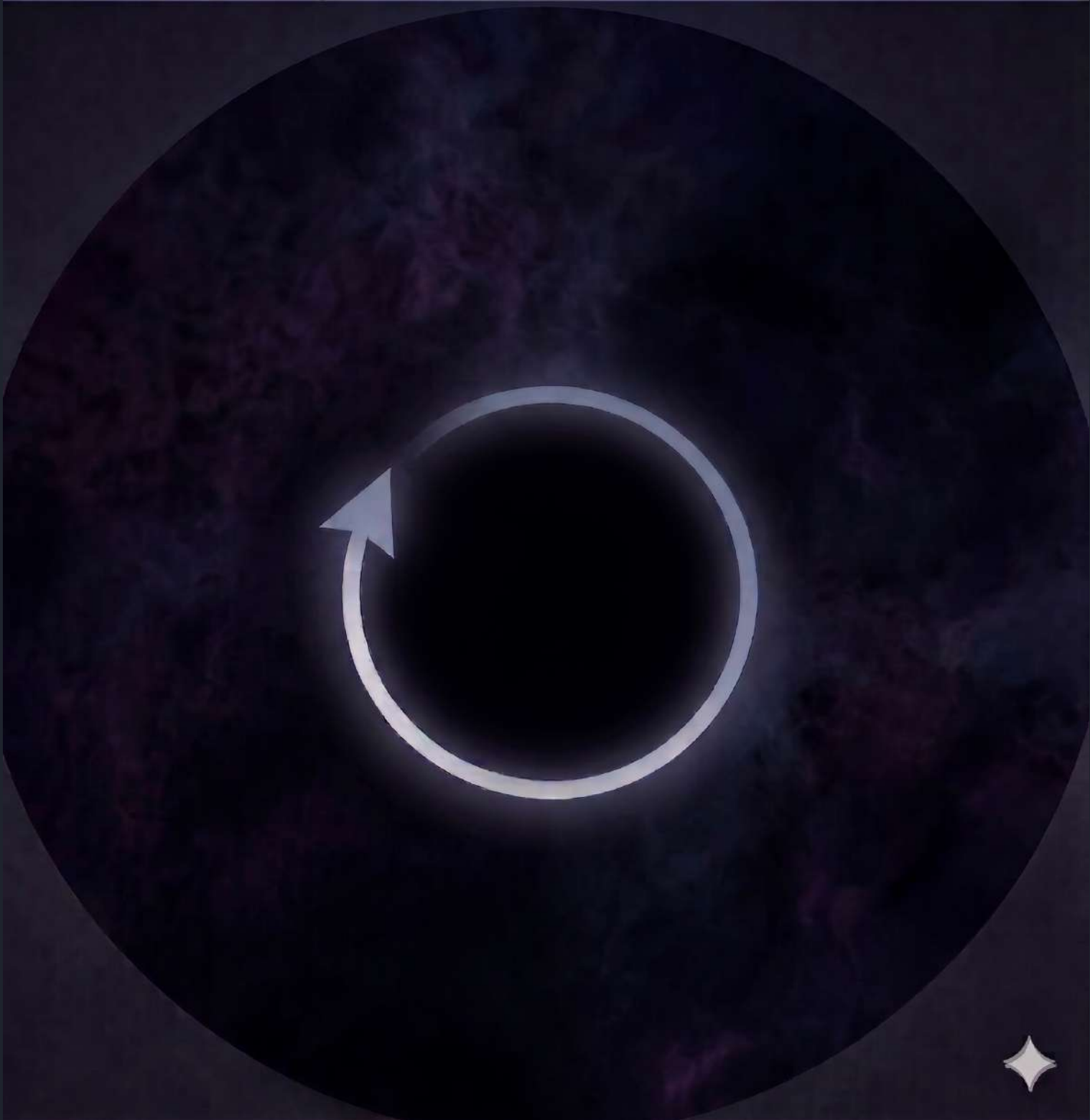
Urs Schreiber

New York University Abu Dhabi
Center for Quantum & Topological
Systems

Das 1-Millionen-Dollar-Rätsel: Hadronen und Quantencomputer

Warum die moderne Physik eine neue globale Mathematik braucht

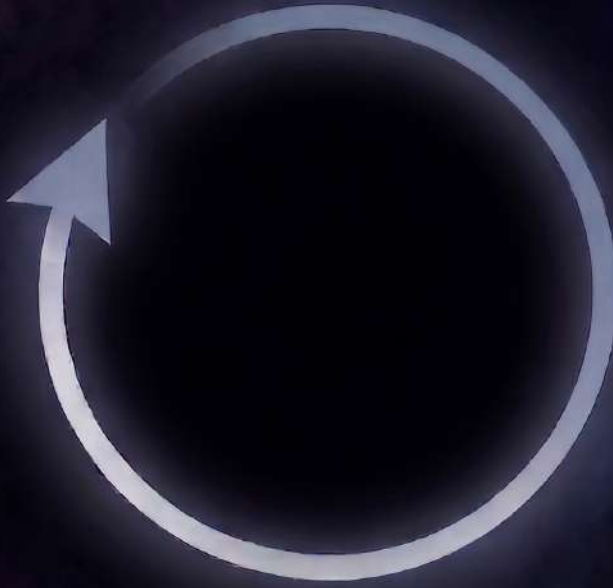




TEILCHEN- PHYSIK



QUARKS IN EINEM ATOMKERN

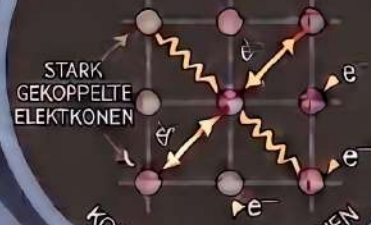


TEILCHEN- PHYSIK

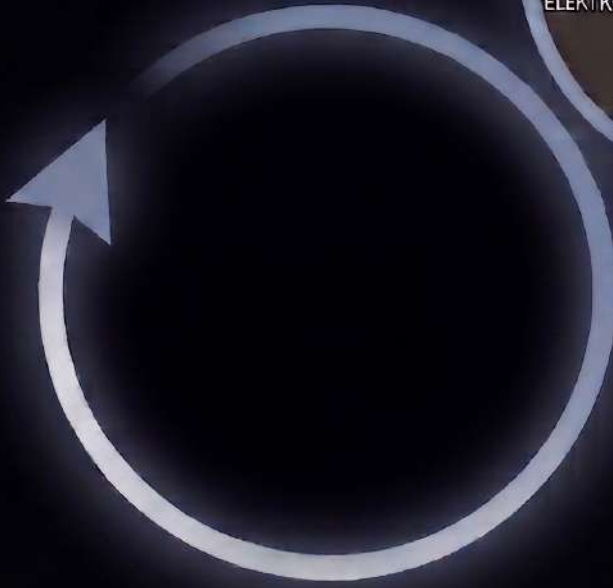


QUARKS IN EINEM ATOMKERN

FESTKÖRPER- PHYSIK



KORRELIERTE ELEKTROKEN

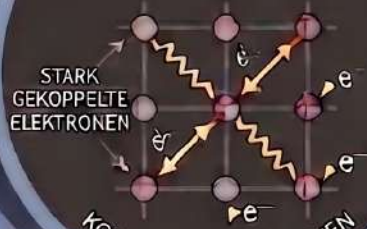


TEILCHEN- PHYSIK



QUARKS IN EINEM ATOMKERN

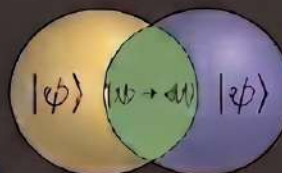
FESTKÖRPER- PHYSIK



STARK
GEKOPPELTE
ELEKTRONEN

KORRELIERTE ELEKTRONEN

QUANTEN- COMPUTING



SUPERPOSITIONS-
ZUSTÄNDE

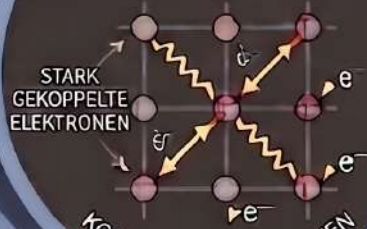


TEILCHEN- PHYSIK



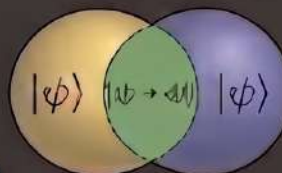
QUARKS IN EINEM ATOMKERN

FESTKÖRPER- PHYSIK



KORRELIERTE ELEKTRONEN

QUANTEN- COMPUTING



SUPERPOSITIONS-
ZUSTÄNDE

TOPOLOGIE



GESCHLECHT UND
ZUSAMMENHANG

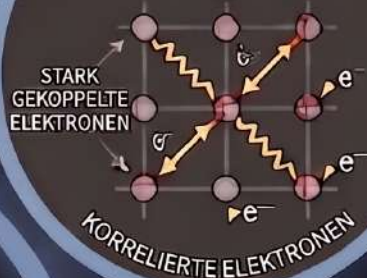


TEILCHEN- PHYSIK

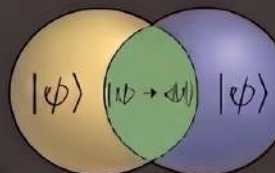


QUARKS IN EINEM ATOMKERN

FESTKÖRPER- PHYSIK



QUANTEN- COMPUTING



SUPERPOSITIONS-
ZUSTÄNDE

HOMOTOPIE THEORIE



KNOTENTHEORIE

TOPOLOGIE



GESCHLECHT UND
ZUSAMMENHANG

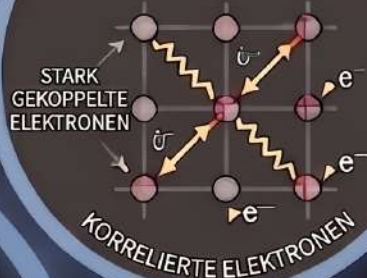


TEILCHEN- PHYSIK

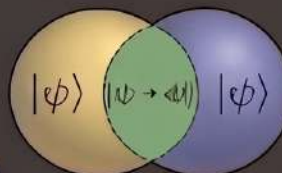


QUARKS IN EINEM ATOMKERN

FESTKÖRPER- PHYSIK

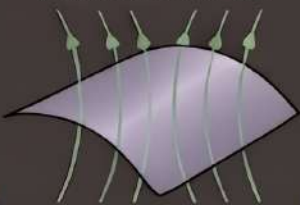


QUANTEN- COMPUTING



SUPERPOSITIONS-
ZUSTÄNDE

GEOMETRISCHE HOMOTOPIE



FLUSS DURCH
FLÄCHEN

HOMOTOPIE THEORIE



KNOTENTHEORIE

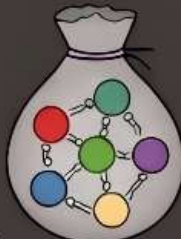
TOPOLOGIE



GESCHLECHT UND
ZUSAMMENHANG

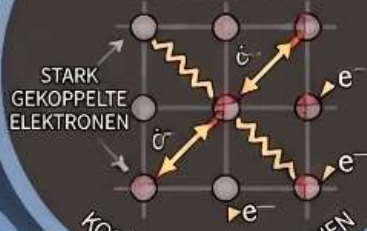


TEILCHEN- PHYSIK



QUARKS IN EINEM ATOMKERN

FESTKÖRPER- PHYSIK



STARK
GEKOPPELTE
ELEKTRONEN

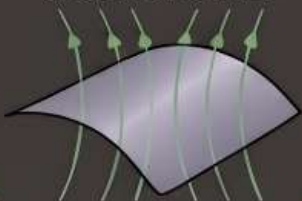
KORRELIERTE ELEKTRONEN

HOMOTOPIE- TYPENTHEORIE

$$x_1 = x_2 : \text{Type}$$

IDENTITÄTSTYPEN

GEOMETRISCHE HOMOTOPIE



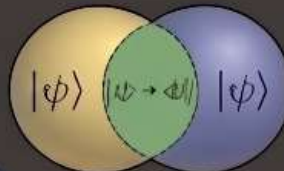
FLUSS DURCH
FLÄCHEN

HOMOTOPIE THEORIE



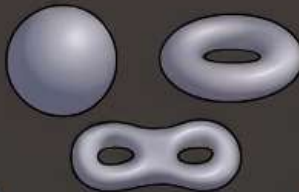
KNOTENTHEORIE

QUANTEN- COMPUTING



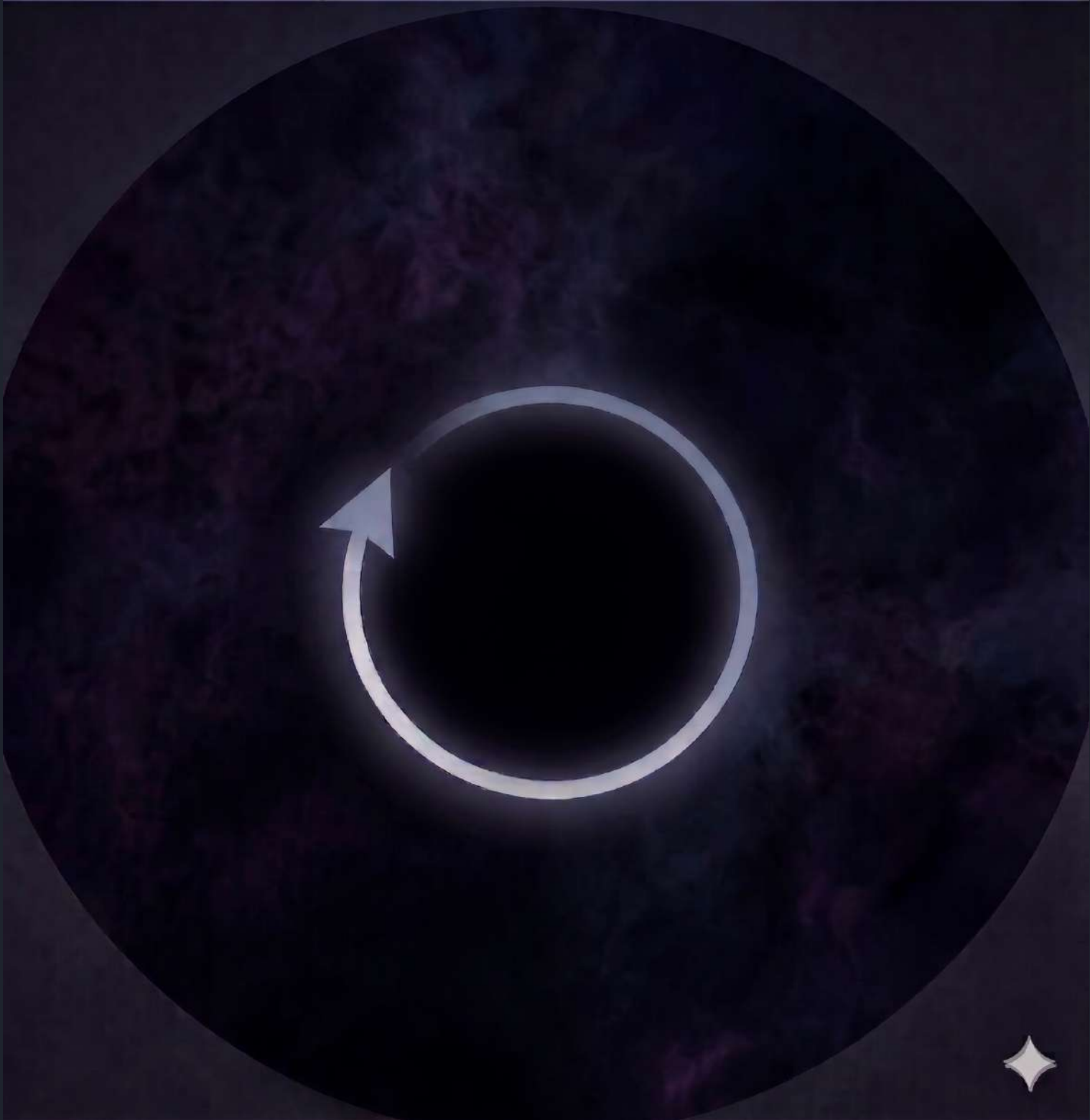
SUPERPOSITIONS-
ZUSTÄNDE

TOPOLOGIE



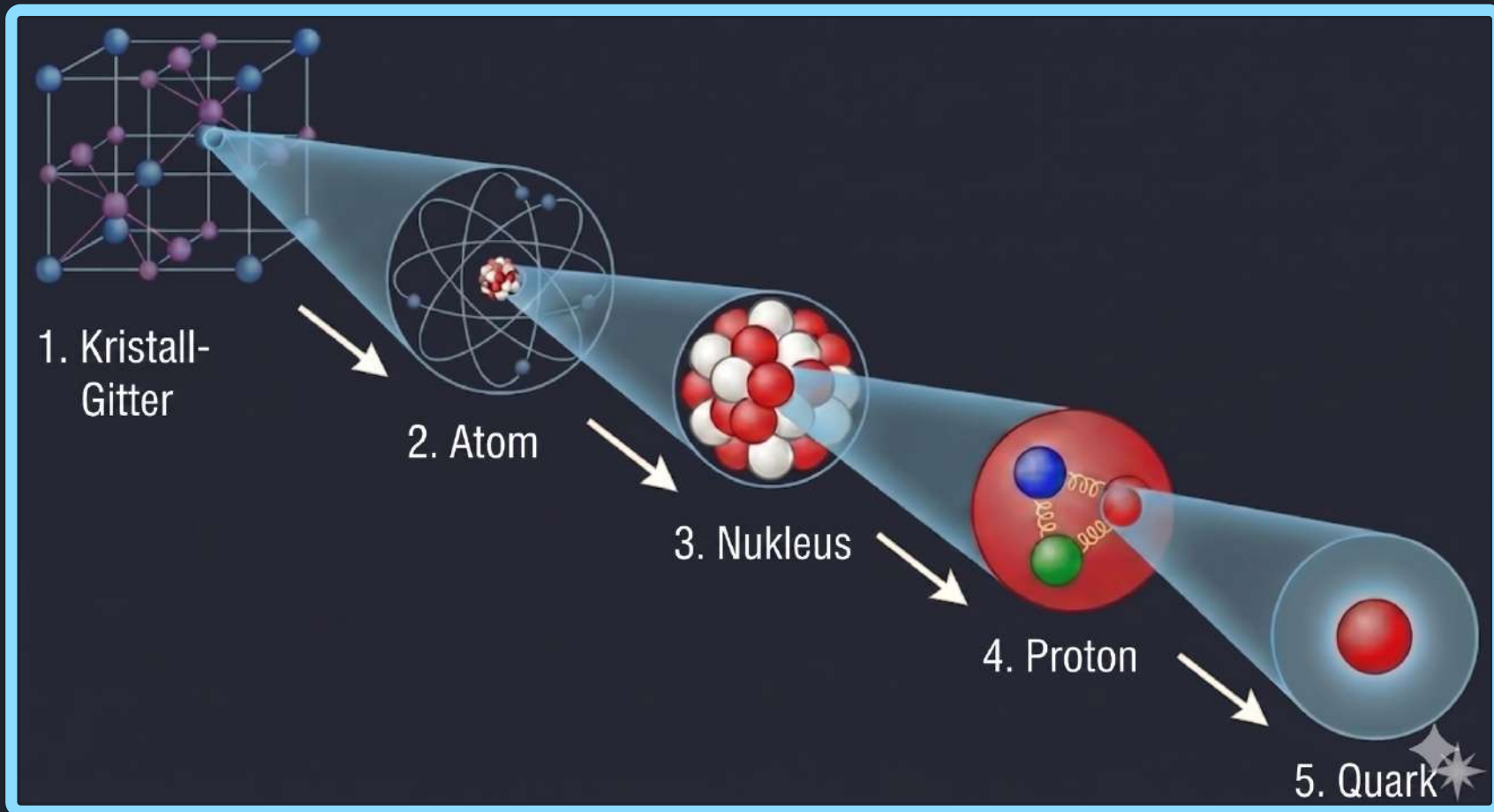
GESCHLECHT UND
ZUSAMMENHANG



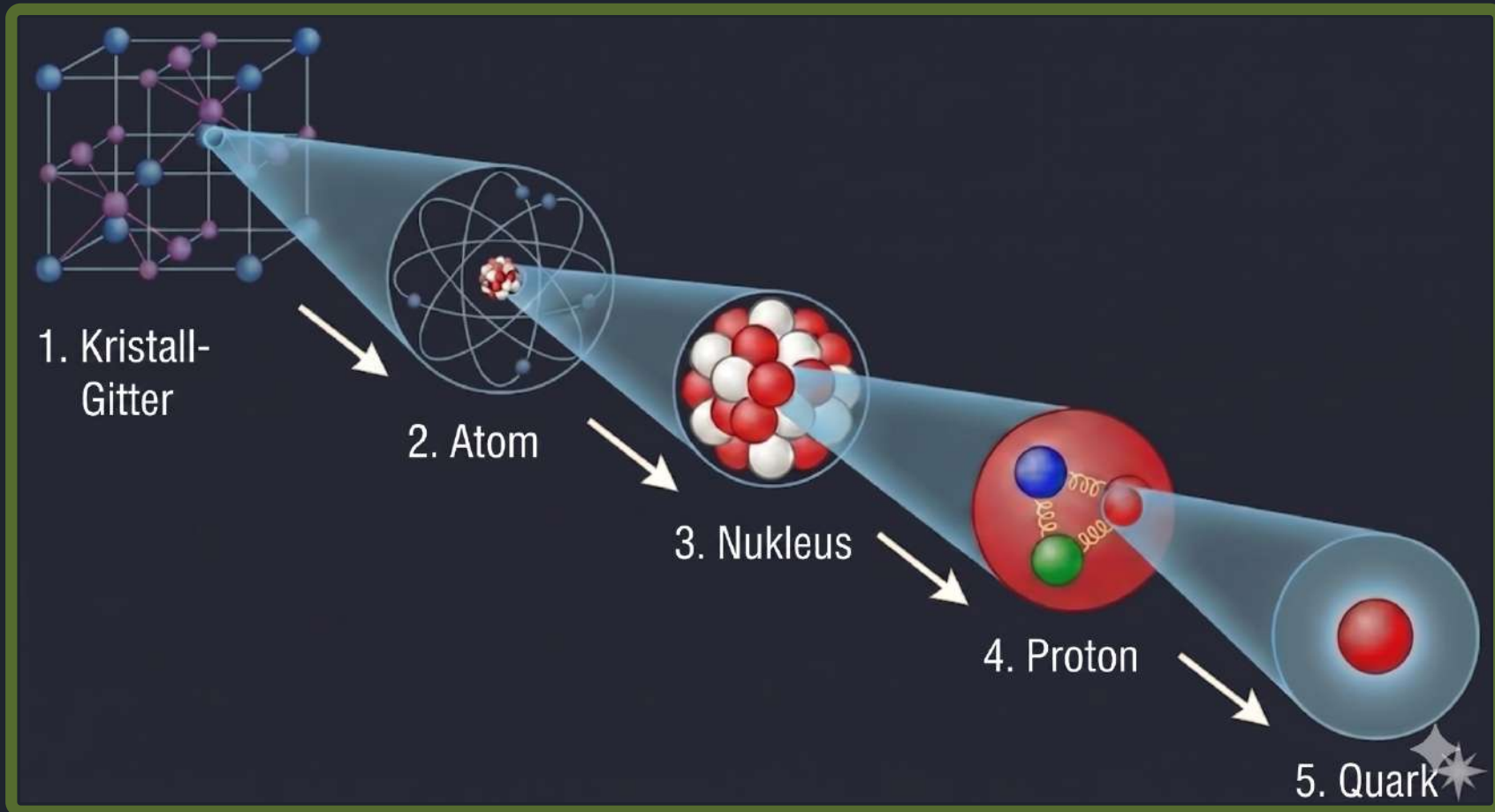


Das *Standardmodell der Teilchenphysik*
sagt, dass, neben Elektronen,
Materie aus “*Quarks*” besteht:

Das *Standardmodell der Teilchenphysik*
sagt, dass, neben Elektronen,
Materie aus “*Quarks*” besteht:

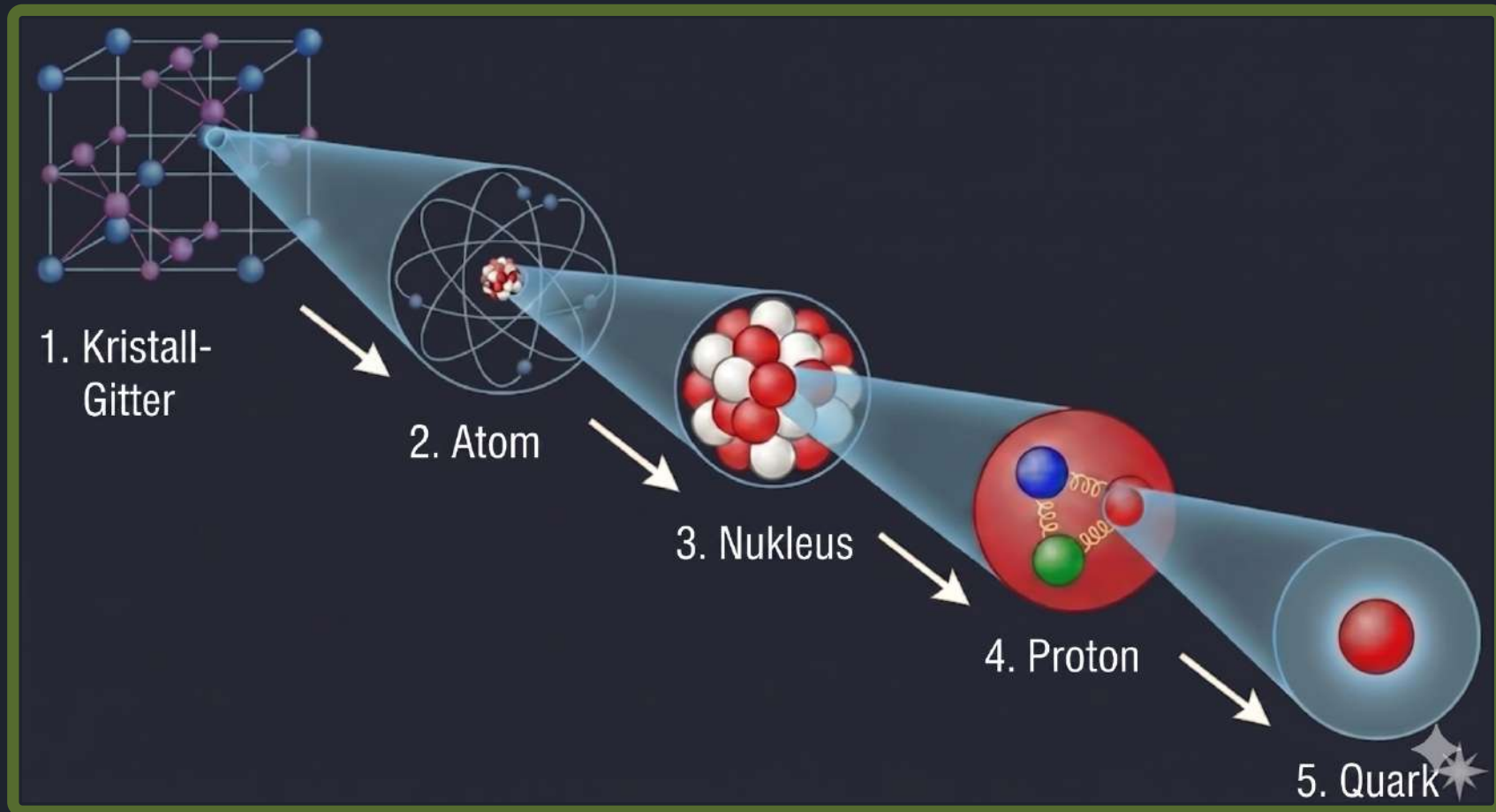


Das *Standardmodell der Teilchenphysik*
sagt, dass, neben Elektronen,
Materie aus “*Quarks*” besteht:



Allgemein werden “*Hadronen*”, wie das Proton,
als *gebundene Quarks* aufgefasst.

Das *Standardmodell der Teilchenphysik*
sagt, dass, neben Elektronen,
Materie aus “*Quarks*” besteht:



Allgemein werden “*Hadronen*”, wie das Proton,
als *gebundene Quarks* aufgefasst.

Populärdarstellungen behaupten, dieses Standardmodell
ließe sich nicht weiter verbessern:

Populärdarstellungen behaupten, dieses Standardmodell
ließe sich nicht weiter verbessern:

Voit 2006



Mathematik-Fakultät der Columbia-Universität

<https://www.math.columbia.edu> › ~voit › wordpress

Das Problem mit der Physik | Not Even Wrong

28. Aug. 2006 — Das Standardmodell ist einfach zu gut. Es ist zu schwierig, einen experimentellen Befund zu finden, der ihm widerspricht, und zu schwierig, mit ...

Populärdarstellungen behaupten, dieses Standardmodell ließe sich nicht weiter verbessern:

Woit 2006



Mathematik-Fakultät der Columbia-Universität

<https://www.math.columbia.edu> › ~woit › wordpress

Das Problem mit der Physik | Not Even Wrong

28. Aug. 2006 — Das Standardmodell ist einfach zu gut. Es ist zu schwierig, einen experimentellen Befund zu finden, der ihm widerspricht, und zu schwierig, mit ...

Dosch 2007

Phänomenologie der Elementarteilchen ist, seit 1980, in einem exzellenten Zustand. Vermutlich gibt es mehr Physiker, die sich darüber beschweren, dass das Standardmodell zu gut ist, als jene, die sich darüber beschweren, dass es zu schlecht sei. Der Grund für dieses paradoxe Verhalten ist, dass die exzellente Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wenig Raum für Beweise für "neue Physik" lässt. ♦

Populärdarstellungen behaupten, dieses Standardmodell ließe sich nicht weiter verbessern:

Woit 2006



Mathematik-Fakultät der Columbia-Universität

<https://www.math.columbia.edu> › ~woit › wordpress

Das Problem mit der Physik | Not Even Wrong

28. Aug. 2006 — Das Standardmodell ist einfach zu gut. Es ist zu schwierig, einen experimentellen Befund zu finden, der ihm widerspricht, und zu schwierig, mit ...

Dosch 2007

Phänomenologie der Elementarteilchen ist, seit 1980, in einem exzellenten Zustand. Vermutlich gibt es mehr Physiker, die sich darüber beschweren, dass das Standardmodell zu gut ist, als jene, die sich darüber beschweren, dass es zu schlecht sei. Der Grund für dieses paradoxe Verhalten ist, dass die exzellente Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wenig Raum für Beweise für "neue Physik" lässt. ✦

Siegel 2025

BIG THINK

Search Topics

Videos Columns Classes Mehr

Zum Ende des Jahres 2025 hat das Standardmodell noch keine Risse

Unser Standardmodell des Universums, sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Kosmologie, bleibt vorerst intakt. Wann werden seine Fundamente bröckeln? ✦

Populärdarstellungen behaupten, dieses Standardmodell ließe sich nicht weiter verbessern:

Woit 2006



Mathematik-Fakultät der Columbia-Universität

<https://www.math.columbia.edu> › ~woit › wordpress

Das Problem mit der Physik | Not Even Wrong

28. Aug. 2006 — Das Standardmodell ist einfach zu gut. Es ist zu schwierig, einen experimentellen Befund zu finden, der ihm widerspricht, und zu schwierig, mit ...

Dosch 2007

Phänomenologie der Elementarteilchen ist, seit 1980, in einem exzellenten Zustand. Vermutlich gibt es mehr Physiker, die sich darüber beschweren, dass das Standardmodell zu gut ist, als jene, die sich darüber beschweren, dass es zu schlecht sei. Der Grund für dieses paradoxe Verhalten ist, dass die exzellente Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wenig Raum für Beweise für "neue Physik" lässt. ✦

Siegel 2025

BIG THINK

Search Topics

Videos Columns Classes Mehr

Zum Ende des Jahres 2025 hat das Standardmodell noch keine Risse

Unser Standardmodell des Universums, sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Kosmologie, bleibt vorerst intakt. Wann werden seine Fundamente bröckeln? ✦

Insbesondere heisst es, dass Experimente
keine Teilchen finden, die nicht vorhergesagt werden:

Insbesondere heisst es, dass Experimente keine Teilchen finden, die nicht vorhergesagt werden:

Wired 2016

A screenshot of a Wired article header. The top navigation bar features the Wired logo on the left and a user profile icon with the text 'ABONNIEREN' on the right. Below the navigation bar, the author's name 'BRENDAN COLE' is displayed in a dark box, followed by the category 'WISSENSCHAFT' and the date and time '5. AUG. 2016 08:02 UHR'. The main headline is 'Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden' in a large, bold, black font. Below the headline, a sub-headline reads 'Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder.' with a small star icon to the right.

W I R E D ABONNIEREN

BRENDAN COLE WISSENSCHAFT 5. AUG. 2016 08:02 UHR

Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden

Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder. ✦

Insbesondere heisst es, dass Experimente keine Teilchen finden, die nicht vorhergesagt werden:

Wired 2016

The screenshot shows the top of a Wired news article. At the top left is the Wired logo. To the right is a user profile icon and the text 'ABONNIEREN'. Below the logo is a navigation menu icon. The article header includes the author 'BRENDAN COLE', the category 'WISSENSCHAFT', and the date and time '5. AUG. 2016 08:02 UHR'. The main headline is 'Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden'. Below the headline is a sub-headline: 'Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder.' There is a small star icon at the bottom right of the sub-headline.

Wired

W I R E D

ABONNIEREN

BRENDAN COLE WISSENSCHAFT 5. AUG. 2016 08:02 UHR

Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden

Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder. ✦

Science 2022

The screenshot shows the top of a Science news article. At the top left is the category 'NACHRICHTEN' and 'PHYSIK'. The main headline is 'Zehn Jahre nach dem Higgs stehen Physiker vor dem Albtraum, nichts anderes mehr zu finden'. Below the headline is a sub-headline: 'Wenn Europas Large Hadron Collider nicht überraschend etwas Neues liefert, könnte das Feld der Teilchenphysik sang- und klanglos enden'. There is a small star icon at the bottom right of the sub-headline. At the bottom of the article is the date and time '13. JUNI 2022 • 13:30 UHR ET' and the author 'VON ADRIAN CHO'.

NACHRICHTEN | PHYSIK

Zehn Jahre nach dem Higgs stehen Physiker vor dem Albtraum, nichts anderes mehr zu finden

Wenn Europas Large Hadron Collider nicht überraschend etwas Neues liefert, könnte das Feld der Teilchenphysik sang- und klanglos enden ✦

13. JUNI 2022 • 13:30 UHR ET • VON ADRIAN CHO

Insbesondere heisst es, dass Experimente keine Teilchen finden, die nicht vorhergesagt werden:

Wired 2016

The screenshot shows the top of a Wired news article. At the top left is the Wired logo. To the right is a user profile icon and the text 'ABONNIEREN'. Below the logo is a navigation bar with 'BRENDAN COLE' in a dark box, 'WISSENSCHAFT', and the date '5. AUG. 2016 08:02 UHR'. The main headline is 'Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden'. Below the headline is a sub-headline: 'Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder.' A small star icon is at the bottom right of the article preview.

Wired

BRENDAN COLE WISSENSCHAFT 5. AUG. 2016 08:02 UHR

Entschuldigung, Leute. Der LHC hat doch kein neues Teilchen gefunden

Physiker versuchen weiterhin zu beweisen, dass das Standardmodell falsch ist, und scheitern immer wieder. ✦

Science 2022

The screenshot shows the top of a Science news article. At the top left is the text 'NACHRICHTEN | PHYSIK'. The main headline is 'Zehn Jahre nach dem Higgs stehen Physiker vor dem Albtraum, nichts anderes mehr zu finden'. Below the headline is a sub-headline: 'Wenn Europas Large Hadron Collider nicht überraschend etwas Neues liefert, könnte das Feld der Teilchenphysik sang- und klanglos enden'. At the bottom left is the date and time '13. JUNI 2022 • 13:30 UHR ET' and the author 'VON ADRIAN CHO'. A small star icon is at the bottom right of the article preview.

NACHRICHTEN | PHYSIK

Zehn Jahre nach dem Higgs stehen Physiker vor dem Albtraum, nichts anderes mehr zu finden

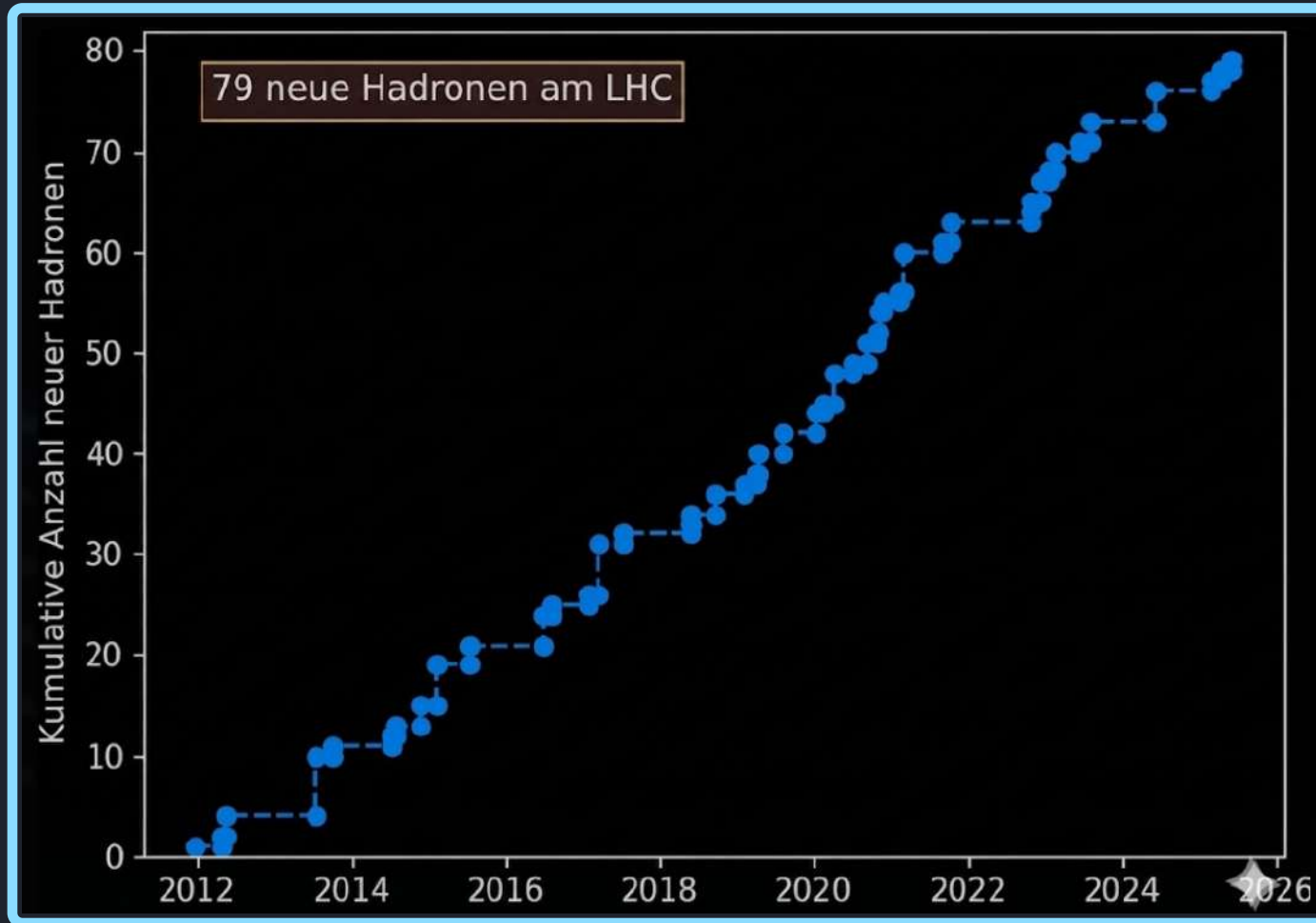
Wenn Europas Large Hadron Collider nicht überraschend etwas Neues liefert, könnte das Feld der Teilchenphysik sang- und klanglos enden

13. JUNI 2022 • 13:30 UHR ET • VON ADRIAN CHO ✦

Und doch finden Experimente
andauernd unvorhergesehene Hadronen:

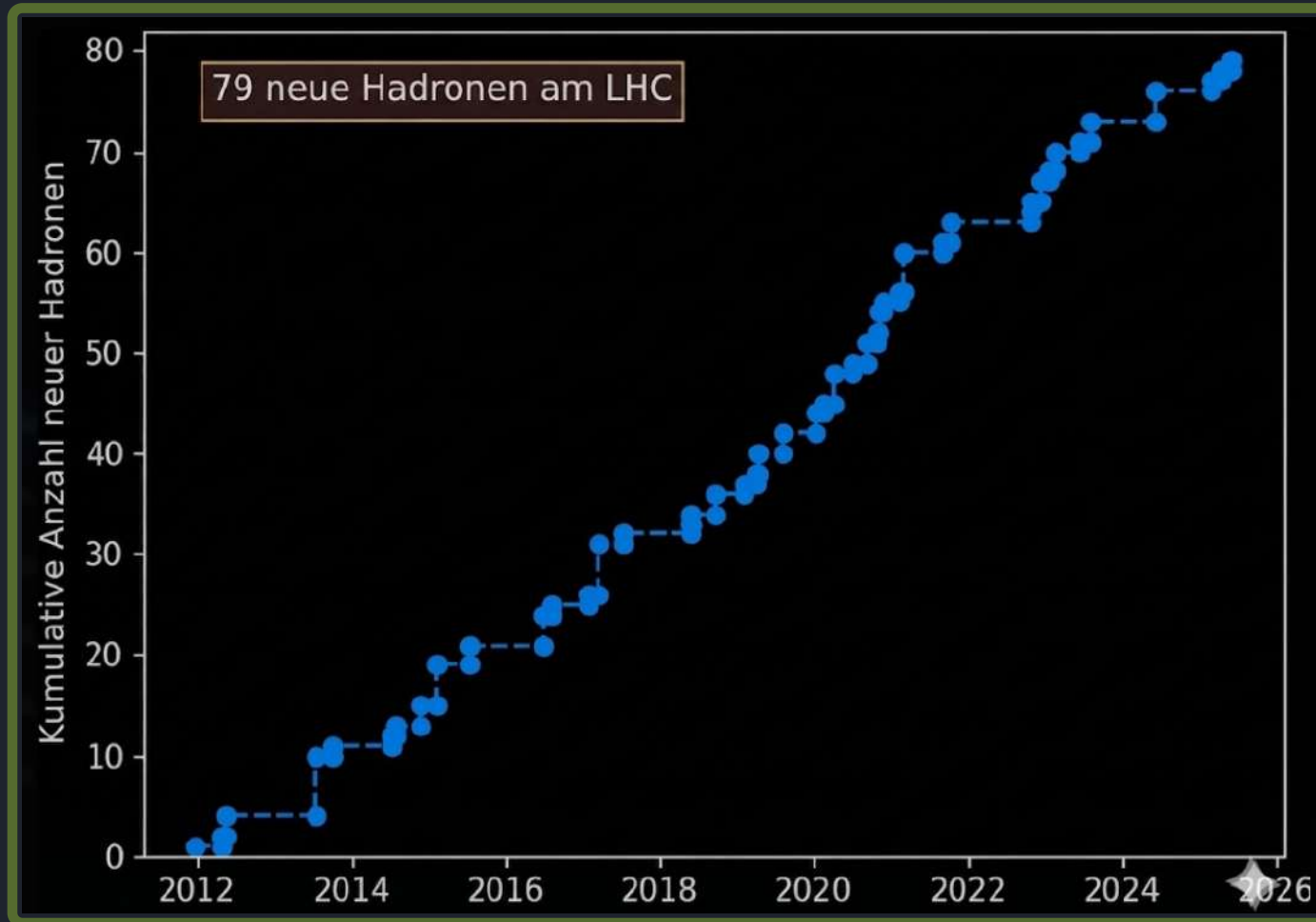
Und doch finden Experimente andauernd unvorhergesehene Hadronen:

Koppenburg 2021-2026



Und doch finden Experimente andauernd unvorhergesehene Hadronen:

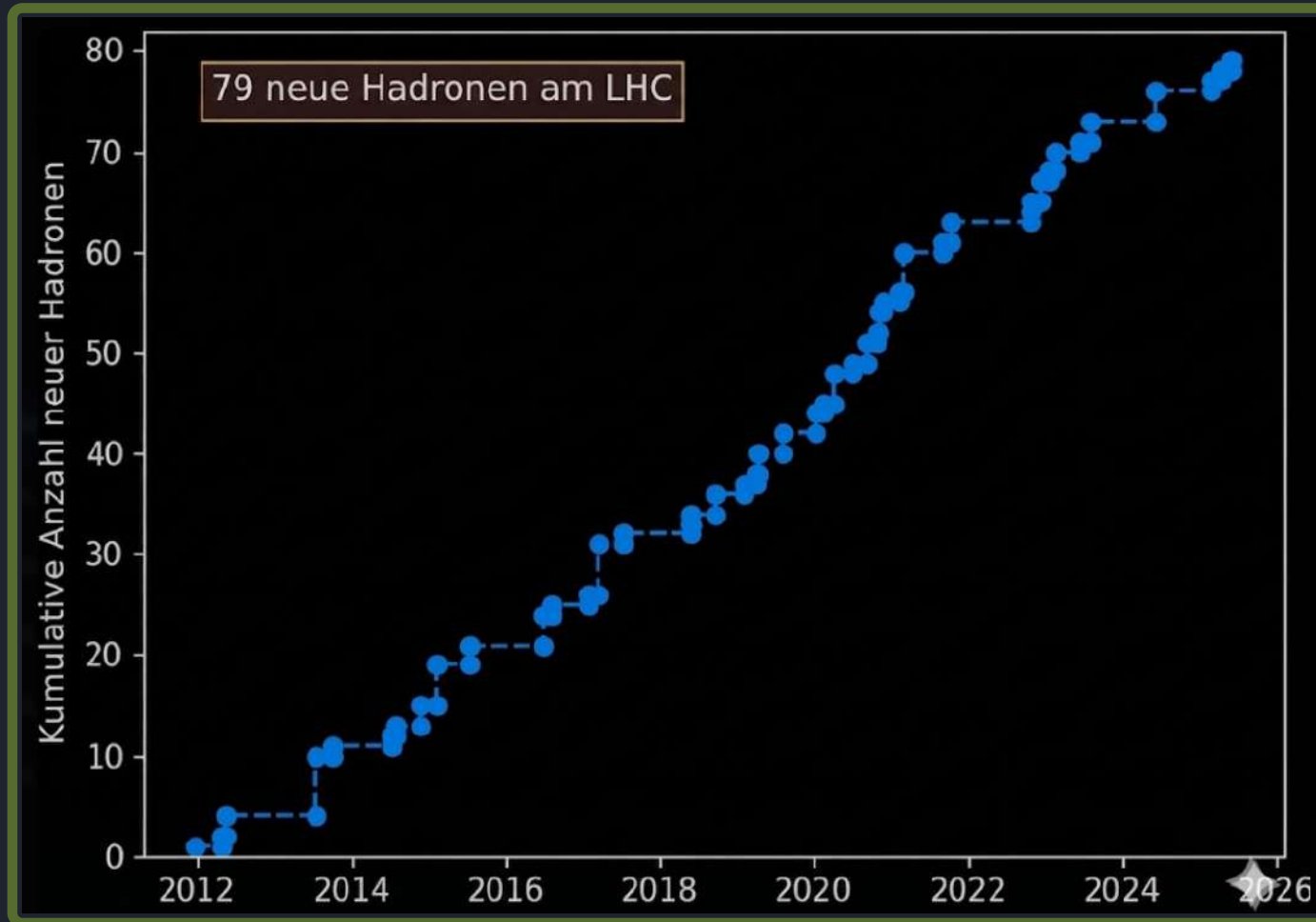
Koppenburg 2021-2026



Obwohl erwartet wird, dass die QCD-Lagrange-Dichte das Spektrum der Hadronen und all ihrer Eigenschaften vollständig beschreibt, gibt es keinen strengen, auf ersten Prinzipien beruhenden Weg, dies mathematisch auszudrücken. Die Quark-Confinement-Vermutung ist experimentell gut bestätigt, aber mathematisch immer noch unbewiesen. Und es ist immer noch unbekannt, welche Kombinationen von Quarks Hadronen bilden können oder nicht. **Experimentelle Anleitung wird benötigt**, um die theoretischen Modelle zu verbessern. Diese Modelle werden dann wiederum benötigt, um hadronische Unsicherheiten einzuschränken, die die Suche nach Phänomenen Neuer Physik beeinflussen.

Und doch finden Experimente andauernd unvorhergesehene Hadronen:

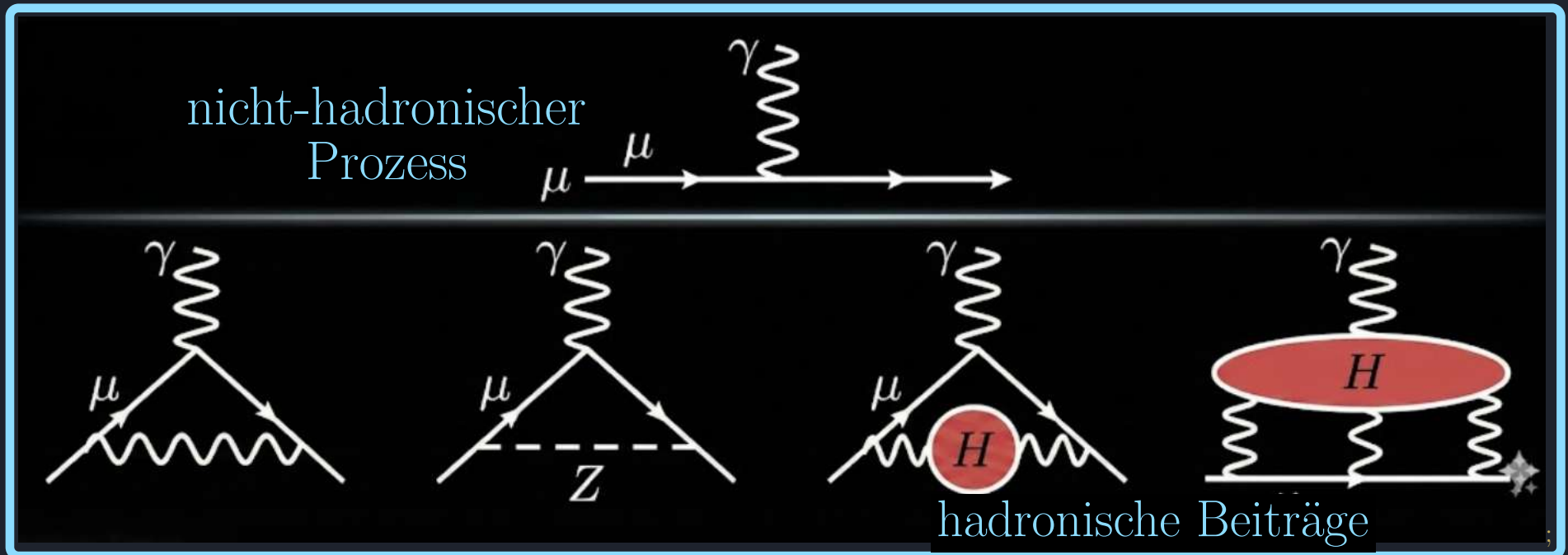
Koppenburg 2021-2026



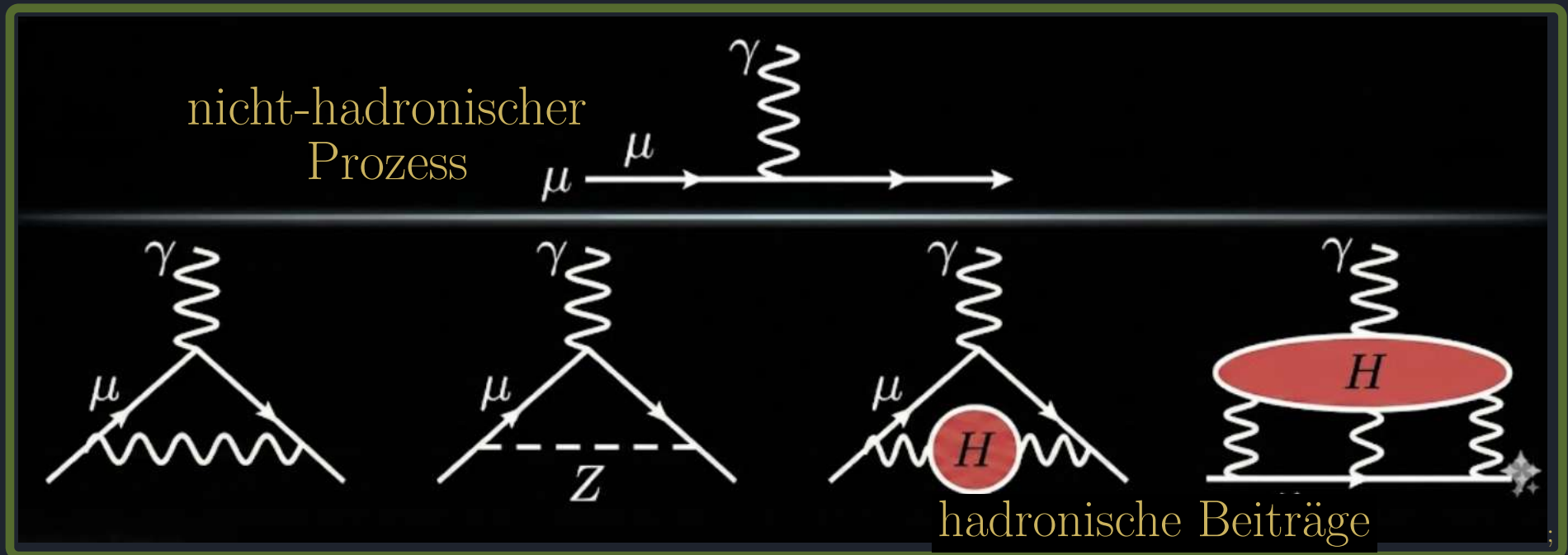
Obwohl erwartet wird, dass die QCD-Lagrange-Dichte das Spektrum der Hadronen und all ihrer Eigenschaften vollständig beschreibt, gibt es keinen strengen, auf ersten Prinzipien beruhenden Weg, dies mathematisch auszudrücken. Die Quark-Confinement-Vermutung ist experimentell gut bestätigt, aber mathematisch immer noch unbewiesen. Und es ist immer noch unbekannt, welche Kombinationen von Quarks Hadronen bilden können oder nicht. **Experimentelle Anleitung wird benötigt**, um die theoretischen Modelle zu verbessern. Diese Modelle werden dann wiederum benötigt, um hadronische Unsicherheiten einzuschränken, die die Suche nach Phänomenen Neuer Physik beeinflussen.

Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermasseln:

Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermasseln:



Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermässeln:



Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermässeln:

Reboud 2025

The image shows a screenshot of a workshop announcement. The title is "Bändigung hadronischer Unsicherheiten innerhalb und außerhalb des Standardmodells". The dates are "22. – 24. Okt. 2025" and the location is "IJCLab, Zeitzone Europa/Paris". A search bar contains the text "Suchbegriff eingeben". A sidebar on the left has "Übersicht" and "Zeitplan" options. The main content area features a highlighted headline: "Hadronische Formfaktoren bleiben eine der Hauptquellen der Unsicherheit in Flavor-Observablen". Below this, it states: "Der Workshop zielt darauf ab, die Gitter-, phänomenologischen und experimentellen Gemeinschaften zusammenzubringen...".

Bändigung hadronischer Unsicherheiten innerhalb und außerhalb des Standardmodells

22. – 24. Okt. 2025
IJCLab
Zeitzone Europa/Paris

Suchbegriff eingeben

- Übersicht
- Zeitplan

Hadronische Formfaktoren bleiben eine der Hauptquellen der Unsicherheit in Flavor-Observablen

Der Workshop zielt darauf ab, die Gitter-, phänomenologischen und experimentellen Gemeinschaften zusammenzubringen...

Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermässeln:

Reboud 2025

Bändigung hadronischer Unsicherheiten innerhalb und außerhalb des Standardmodells

22. – 24. Okt. 2025
IJCLab
Zeitzone Europa/Paris

Suchbegriff eingeben

Übersicht
Zeitplan

Hadronische Formfaktoren bleiben eine der Hauptquellen der Unsicherheit in Flavor-Observablen
Der Workshop zielt darauf ab, die Gitter-, phänomenologischen und experimentellen Gemeinschaften zusammenzubringen...

CernCourier 2026

Spannungen bleiben
Im Wesentlichen, rührt alle Unsicherheit in $g-2$ von der hadronischen Vakuumpolarisation her

Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermässeln:

Reboud 2025

Bändigung hadronischer Unsicherheiten innerhalb und außerhalb des Standardmodells

22. – 24. Okt. 2025
IJCLab
Zeitzone Europa/Paris

Suchbegriff eingeben

Übersicht
Zeitplan

Hadronische Formfaktoren bleiben eine der Hauptquellen der Unsicherheit in Flavor-Observablen
Der Workshop zielt darauf ab, die Gitter-, phänomenologischen und experimentellen Gemeinschaften zusammenzubringen...

CernCourier 2026

Spannungen bleiben
Im Wesentlichen, rührt alle Unsicherheit in $g-2$ von der hadronischen Vakuumpolarisation her

Athron et al. 2023

Hadronische Unsicherheiten versus neue Physik für die W-Boson-Masse und Myon- $g - 2$ -Anomalien

[Peter Athron](#) ✉, [Andrew Fowlie](#) ✉, [Chih-Ting Lu](#) ✉, [Lei Wu](#) ✉, [Yongcheng Wu](#) ✉ & [Bin Zhu](#) ✉

Nature Communications **14**, Artikelnummer: 659 (2023) | [Diesen Artikel zitieren](#)

Außerdem sind schwer fassbare hadronische Prozesse dafür bekannt, auch andere “Vorhersagen” des Standardmodells zu vermässeln:

Reboud 2025

Bändigung hadronischer Unsicherheiten innerhalb und außerhalb des Standardmodells

22. – 24. Okt. 2025
IJCLab
Zeitzone Europa/Paris

Suchbegriff eingeben

Übersicht
Zeitplan

Hadronische Formfaktoren bleiben eine der Hauptquellen der Unsicherheit in Flavor-Observablen
Der Workshop zielt darauf ab, die Gitter-, phänomenologischen und experimentellen Gemeinschaften zusammenzubringen...

CernCourier 2026

Spannungen bleiben
Im Wesentlichen, rührt alle Unsicherheit in $g-2$ von der hadronischen Vakuumpolarisation her

Athron et al. 2023

Hadronische Unsicherheiten versus neue Physik für die W-Boson-Masse und Myon- $g - 2$ -Anomalien

Peter Athron , Andrew Fowlie , Chih-Ting Lu , Lei Wu , Yongcheng Wu  & Bin Zhu 

Nature Communications **14**, Artikelnummer: 659 (2023) | [Diesen Artikel zitieren](#)

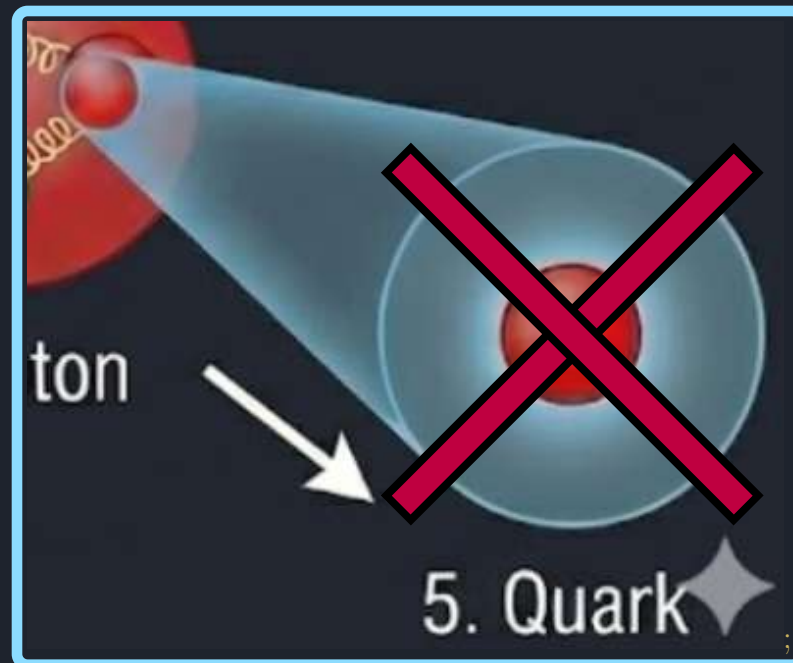
Was ist also los?

Öffentliches Geheimnis:
Quarks sind eine eigenartige Theorie.

Was ist also los?

Öffentliches Geheimnis:
Quarks sind eine eigenartige Theorie.

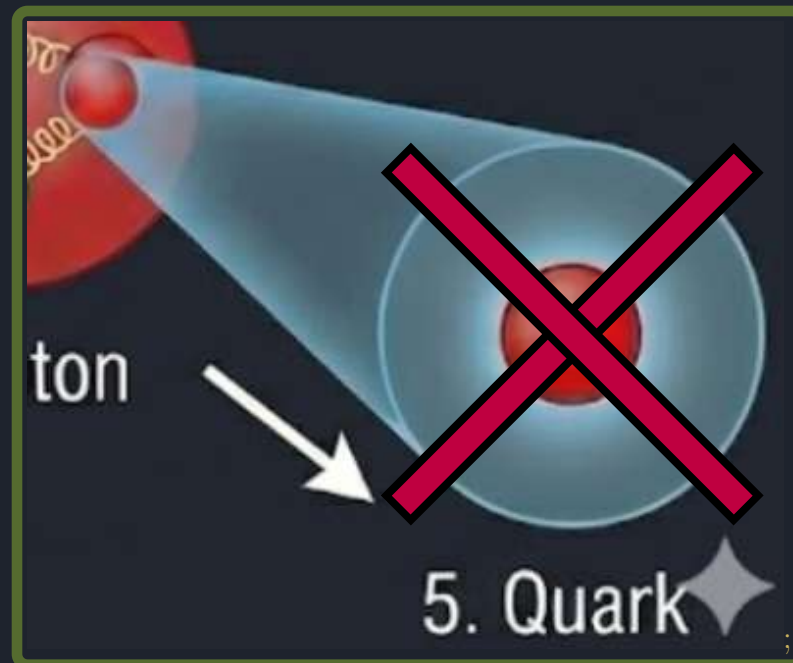
Individuelle Quarks existieren nicht,



Was ist also los?

Öffentliches Geheimnis:
Quarks sind eine eigenartige Theorie.

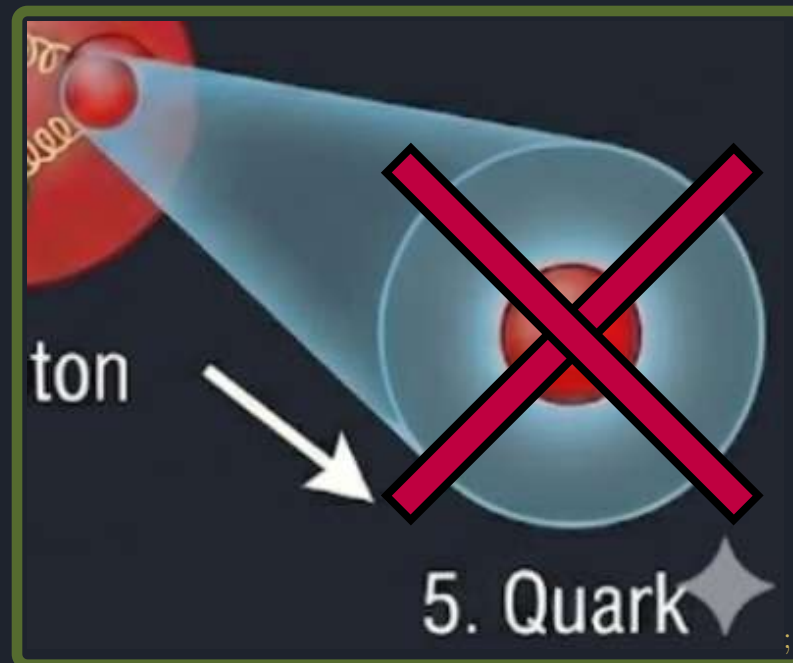
Individuelle Quarks existieren nicht,
nur in Hadronen gebundene Quarks existieren,



Was ist also los?

Öffentliches Geheimnis:
Quarks sind eine eigenartige Theorie.

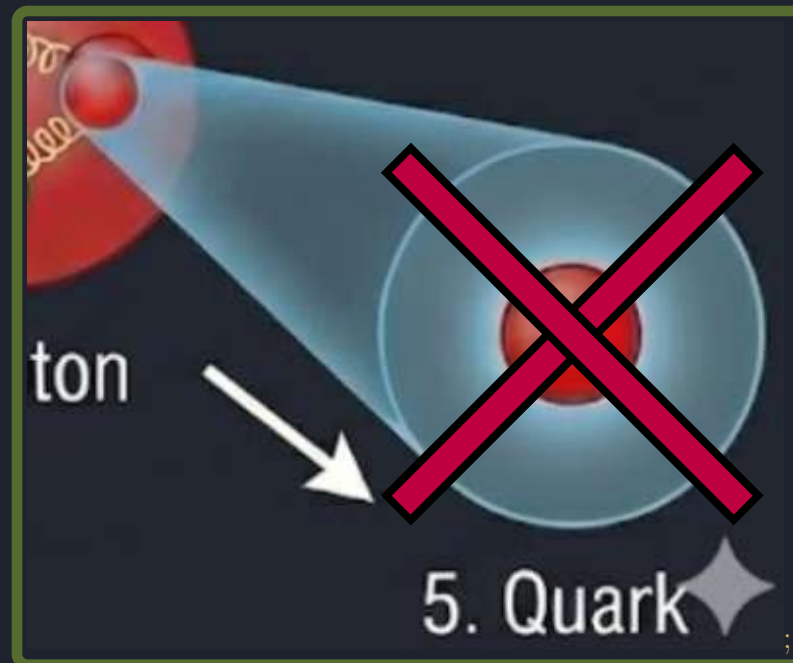
Individuelle Quarks existieren nicht,
nur in Hadronen gebundene Quarks existieren,
aber der Bindungsmechanismus ist *nicht erklärt!*



Was ist also los?

Öffentliches Geheimnis:
Quarks sind eine eigenartige Theorie.

Individuelle Quarks existieren nicht,
nur in Hadronen gebundene Quarks existieren,
aber der Bindungsmechanismus ist *nicht erklärt!*



Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:

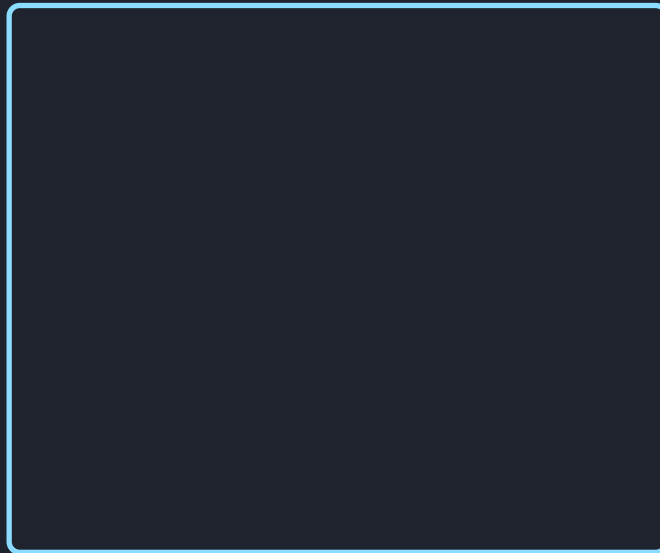
*“Das Standardmodell beschreibt Hadronen **im Prinzip**.”*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene *Faustregeln* verwendet:



Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,
Bag Models,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,
Bag Models,
Holographic QCD,*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,
Bag Models,
Holographic QCD,
...*

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,
Bag Models,
Holographic QCD,
...*

Das hat gewisse Ähnlichkeit mit Alchemie...

Die Einstellung in der Teilchenphysik ist:
“*Das Standardmodell beschreibt Hadronen im Prinzip.*”

Doch *in der Praxis* tut es das kaum: stattdessen
werden verschiedene Faustregeln verwendet:

*Chiral Perturbation theory,
Constituent Quark Model,
Nambu-Jona-Lasinio model,
Heavy Quark Effective Theory,
Skyrme model,
QCD Sum Rules,
Bag Models,
Holographic QCD,
...*

Das hat gewisse Ähnlichkeit mit Alchemie...

Der Elefant im Raum:

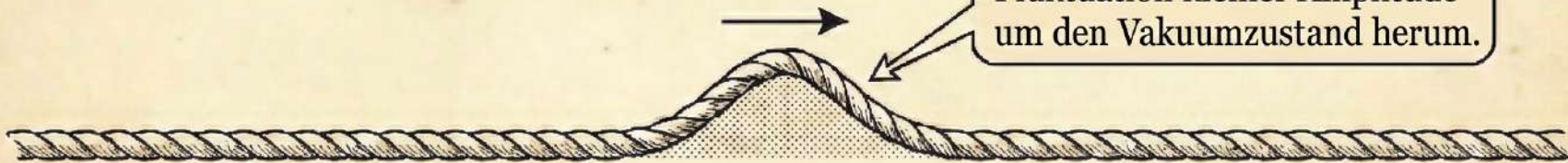
Der Elephant im Raum:

Hadronen sind *nicht-perturbative* Effekte:
nicht nur kleine Störungen des Vakuums.

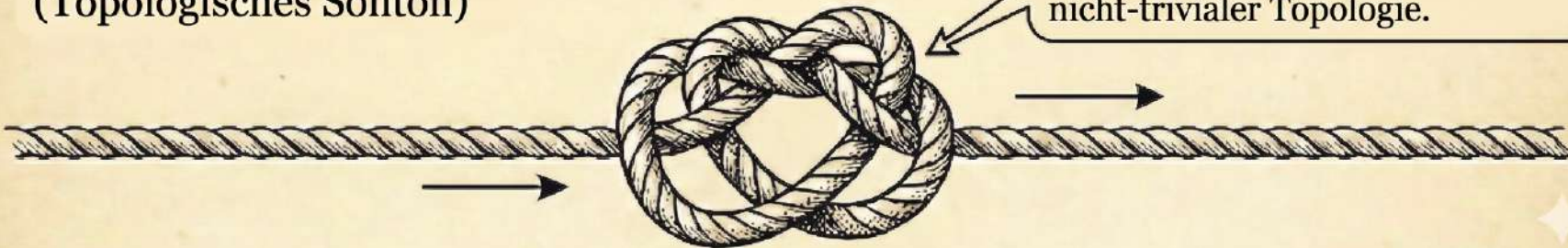
Der Elephant im Raum:

Hadronen sind *nicht perturbative* Effekte:
nicht nur kleine Störungen des Vakuums.

a) Perturbative Anregung (Welle)



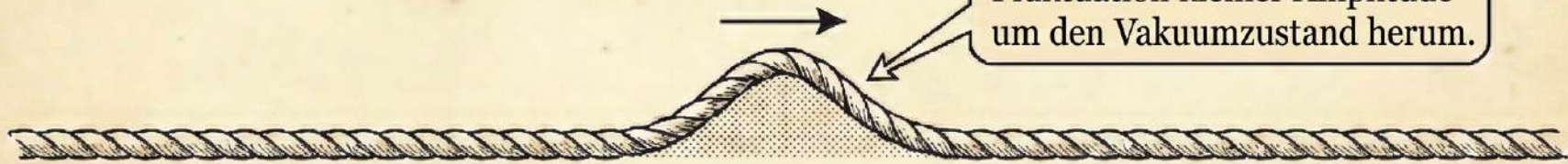
b) Nichtperturbative Anregung
(Topologisches Soliton)



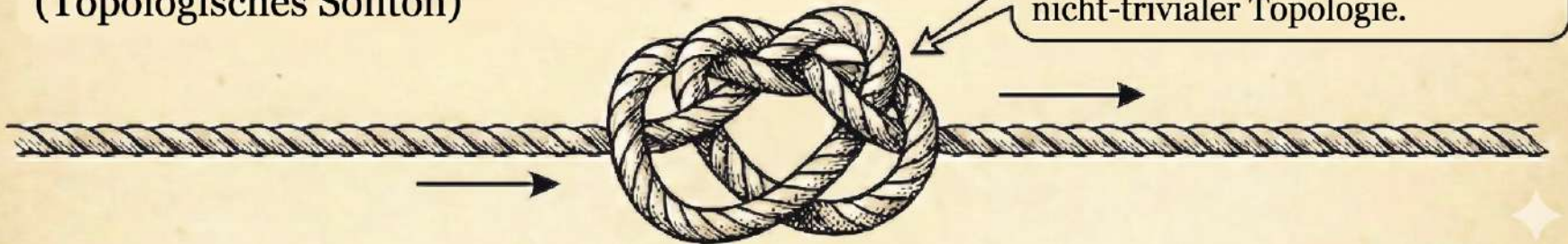
Der Elephant im Raum:

Hadronen sind *nicht perturbative* Effekte:
nicht nur kleine Störungen des Vakuums.

a) Perturbative Anregung (Welle)



b) Nichtperturbative Anregung
(Topologisches Soliton)

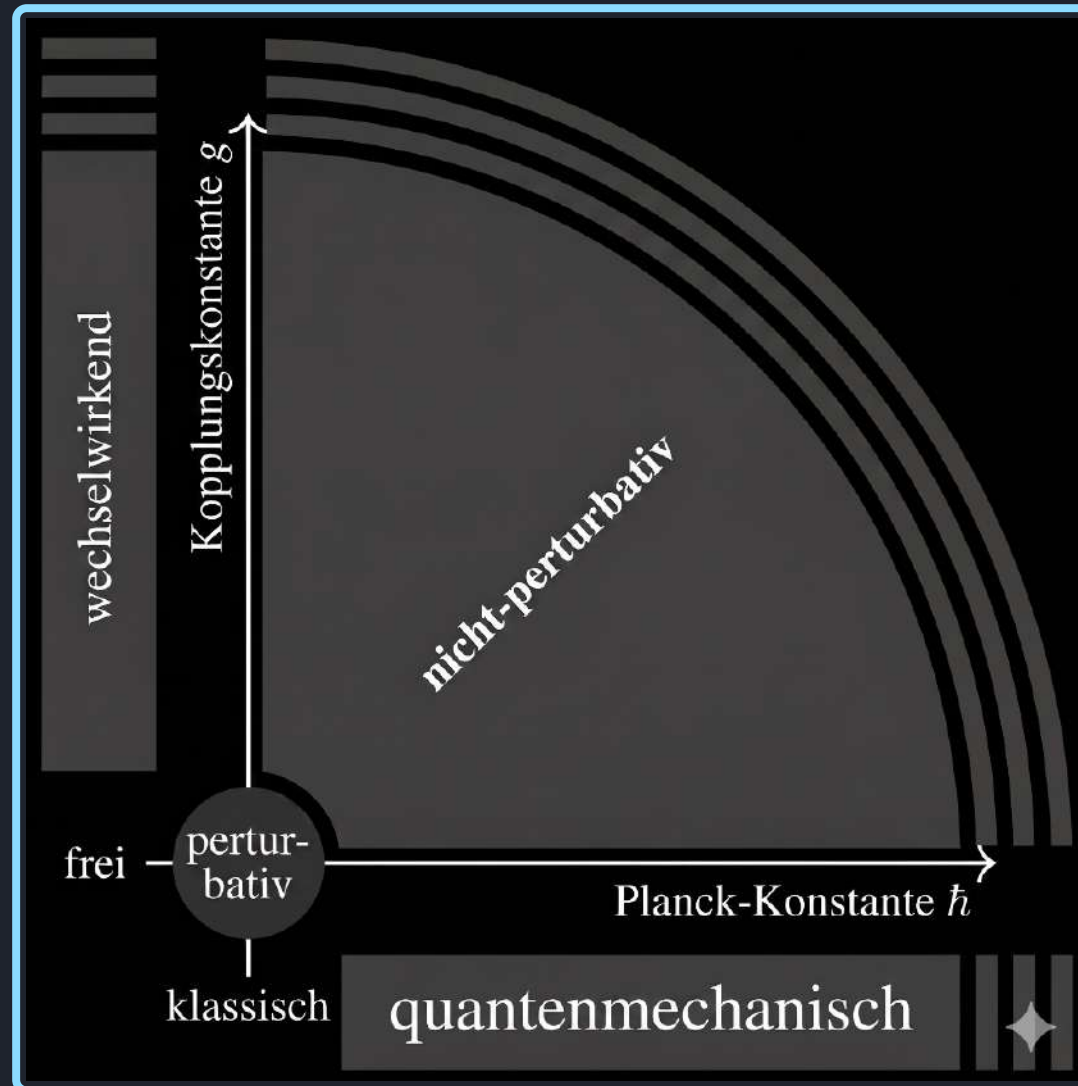


Aber die Quantenfeldtheorie des 20ten Jahrhunderts
war vornehmlich perturbative Störungstheorie,

Aber die Quantenfeldtheorie des 20ten Jahrhunderts
war vornehmlich perturbative Störungstheorie,

fokussiert auf eine infinitesimale Umgebung
im Raum aller Quantenphänomene

Aber die Quantenfeldtheorie des 20ten Jahrhunderts
war vornehmlich perturbative Störungstheorie,
fokussiert auf eine infinitesimale Umgebung
im Raum aller Quantenphänomene



Das *Clay Math Institut* hat im Jahr 2000 erklärt:

Die nicht-perturbative Formulierung von Hadronen ist ein *Jahrtausendproblem (Millennium Problem)* der Mathematik

Das *Clay Math Institut* hat im Jahr 2000 erklärt:
Die nicht-perturbative Formulierung von Hadronen* ist ein
Jahrtausendproblem (Millennium Problem) der Mathematik

* Genaugenommen fragt das CMI zunächst nach
einer stichhaltigen Herleitung von “*glueballs*”,
dies sind Verwandte der Hadronen.

Das *Clay Math Institut* hat im Jahr 2000 erklärt:
Die nicht-perturbative Formulierung von Hadronen* ist ein
Jahrtausendproblem (Millennium Problem) der Mathematik
und lobt 1 Million Dollar Preisgeld aus



* Genaugenommen fragt das CMI zunächst nach einer stichhaltigen Herleitung von “*glueballs*”, dies sind Verwandte der Hadronen.

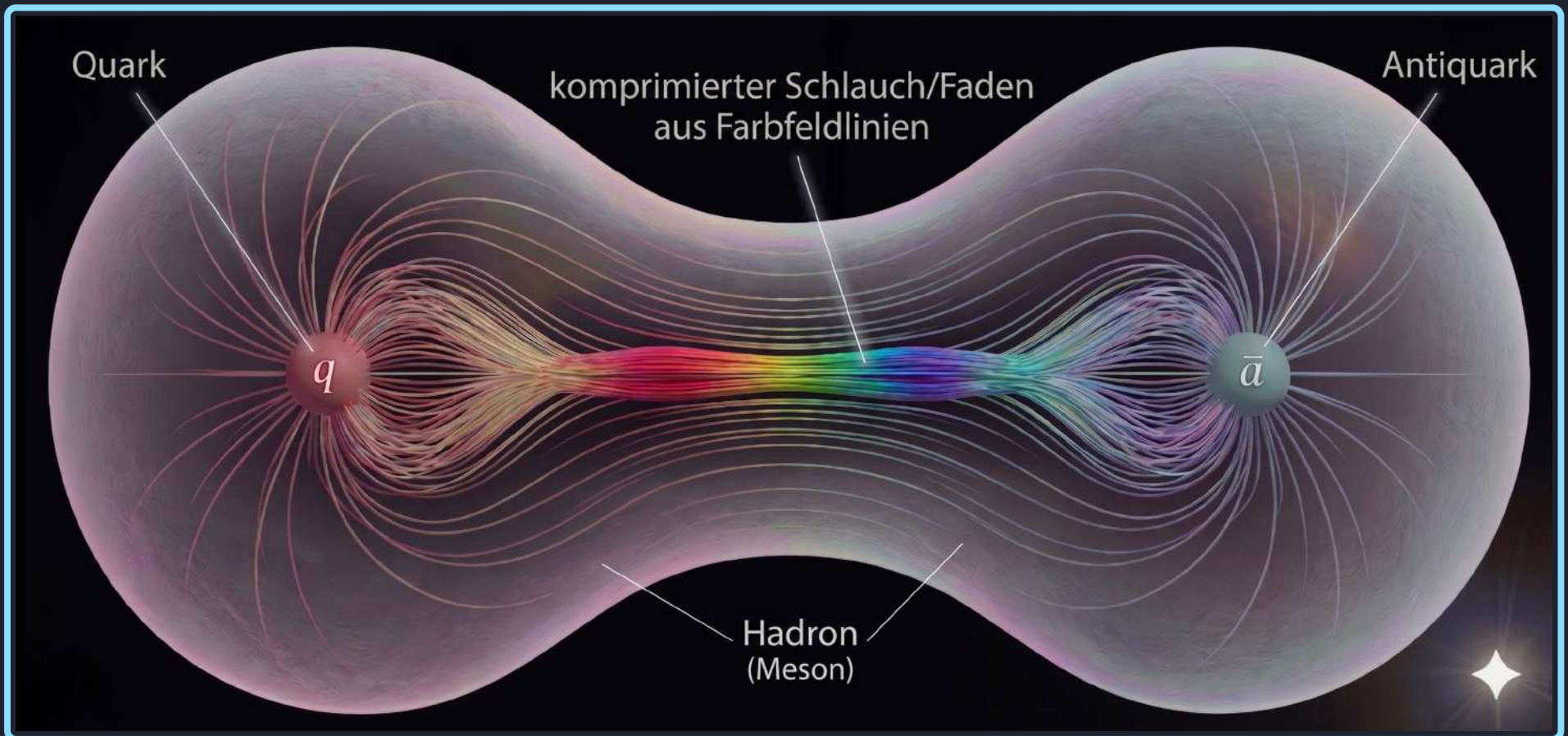
Obwohl ein Beweis von Quarkeneinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks,
komprimiert
zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.

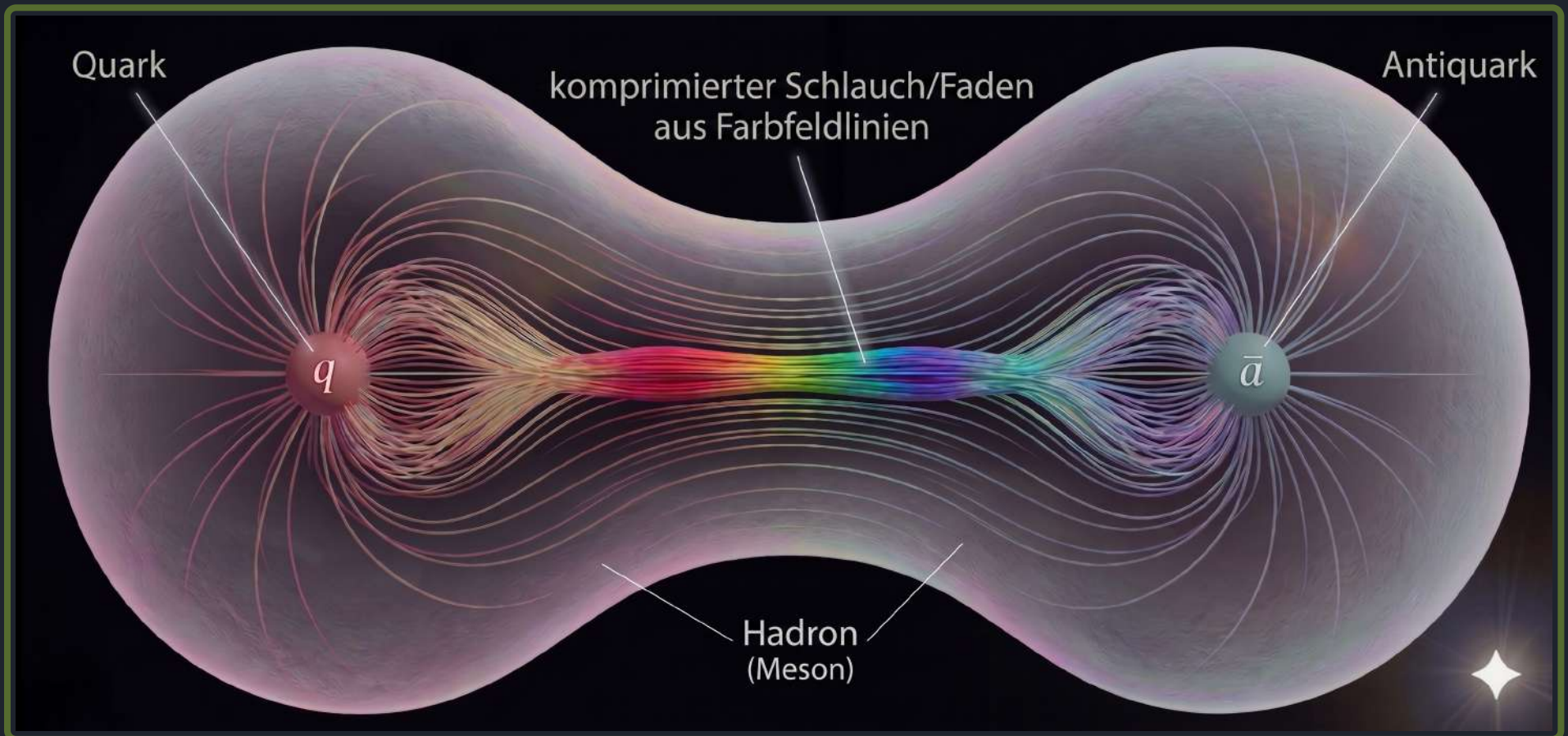
Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks,
komprimiert
zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.



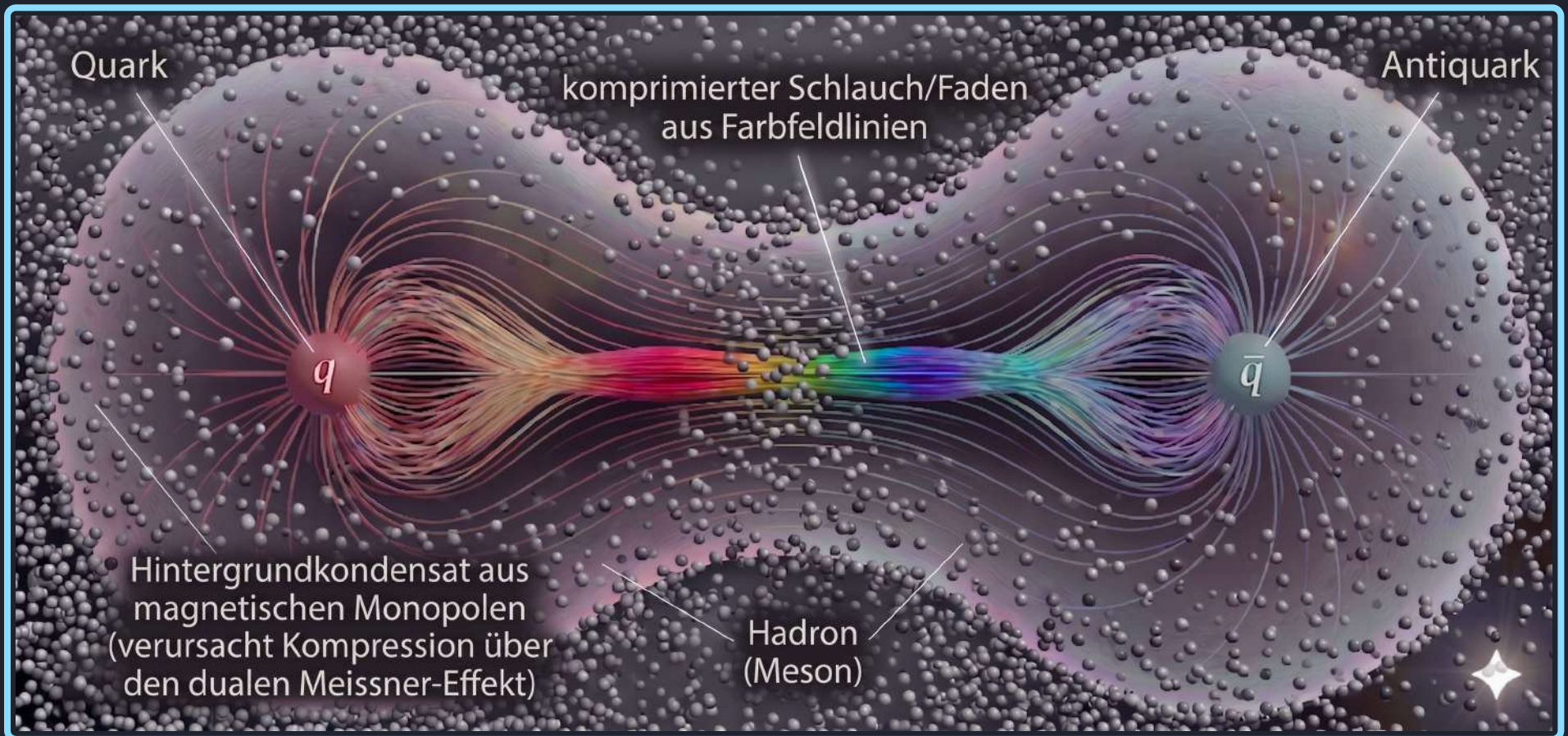
Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks, komprimiert durch ein Kondensat von *Magnetischen Monopolen* zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.



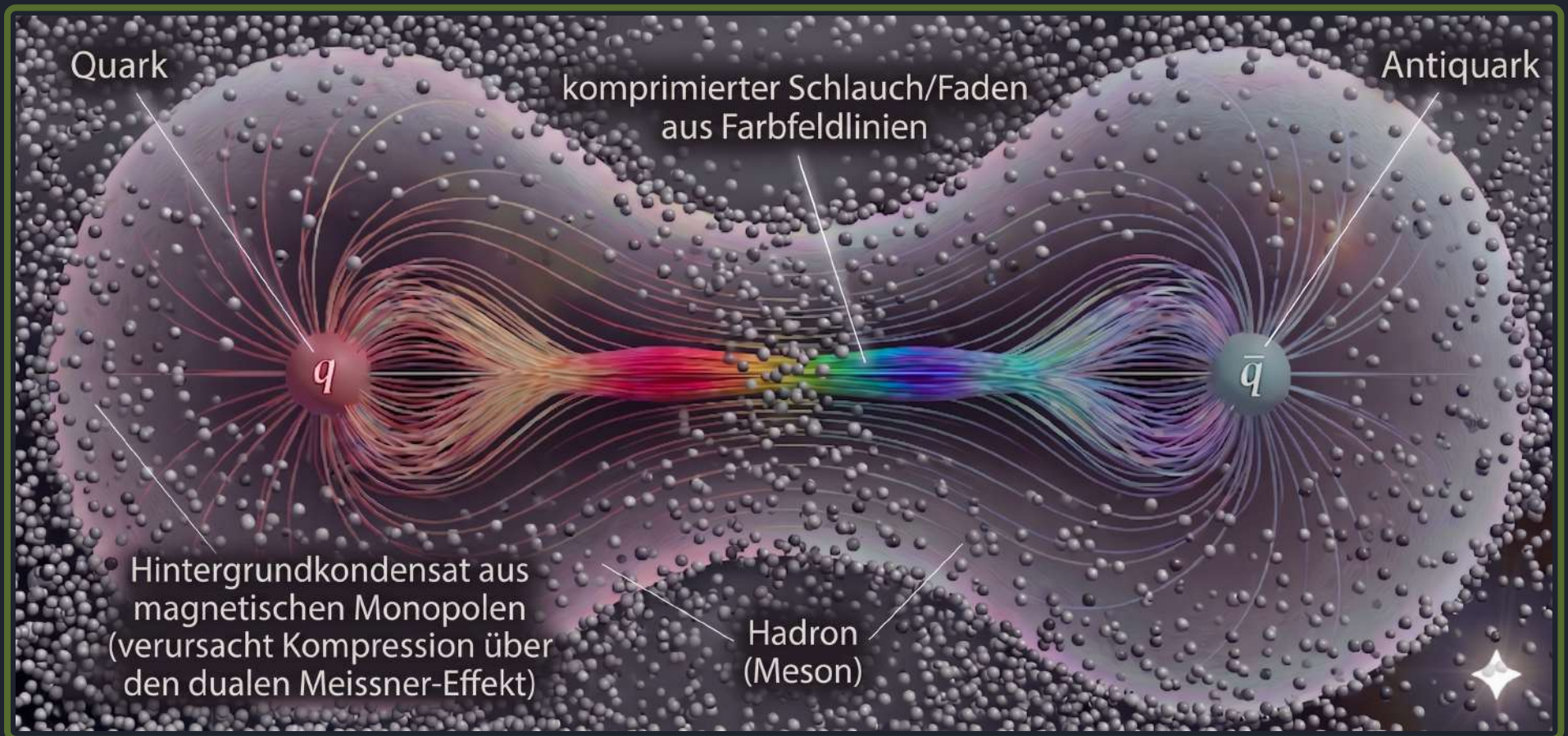
Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks, komprimiert durch ein Kondensat von *Magnetischen Monopolen* zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.



Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

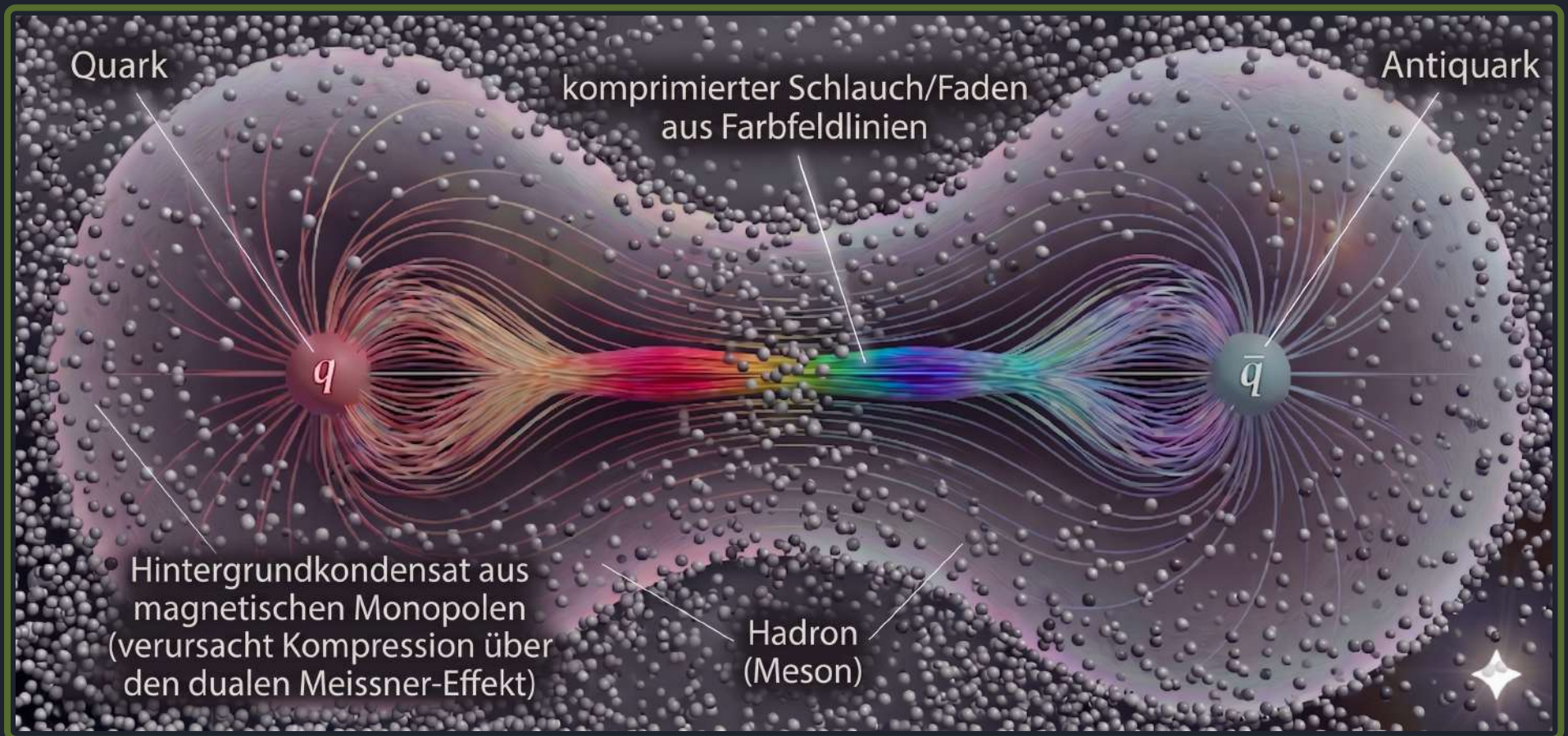
Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks, komprimiert durch ein Kondensat von *Magnetischen Monopolen* zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.



Also ist die Frage: Wie macht man dies mathematisch präzise?

Obwohl ein Beweis von Quarkeinschluss in Hadronen weit offen bleibt, hat sich in den Jahrzehnten ein plausibles *heuristisches* Bild verfestigt:

Da sind “Farb”-*Flusslinien* zwischen Quarks, komprimiert durch ein Kondensat von *Magnetischen Monopolen* zu einem *Fluss-Schlauch*, der sie zusammenhält.



Also ist die Frage: Wie macht man dies mathematisch präzise?
Später mehr dazu. Zunächst zu einem verwandten Problem...

Ähnliche Probleme suchen die Festkörperphysik heim,
wo viele Teilchen zu Festkörpern oder Flüssigkeiten kondensieren.

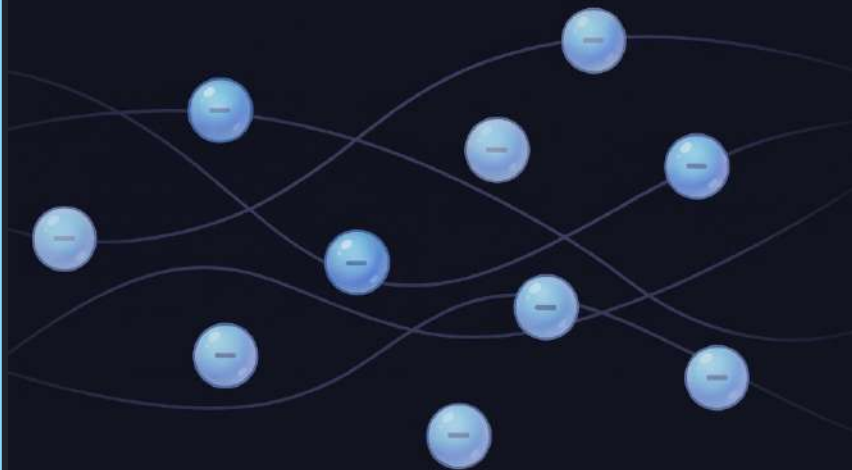
Ähnliche Probleme suchen die Festkörperphysik heim,
wo viele Teilchen zu Festkörpern oder Flüssigkeiten kondensieren.

Hier werden nicht-perturbative starke Wechselwirkungen
als *starke Korrelationen* bezeichnet

Ähnliche Probleme suchen die Festkörperphysik heim, wo viele Teilchen zu Festkörpern oder Flüssigkeiten kondensieren.

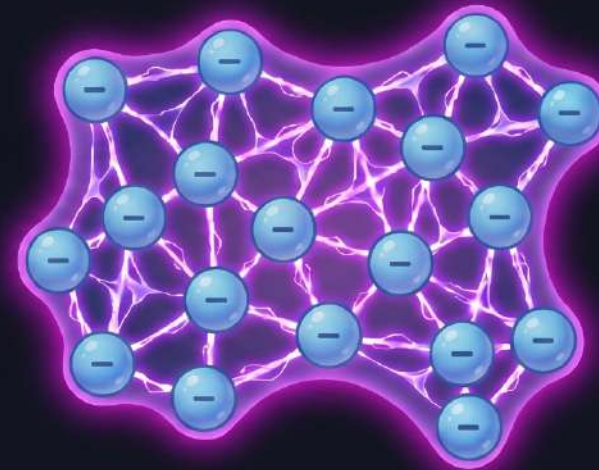
Hier werden nicht-perturbative starke Wechselwirkungen als *starke Korrelationen* bezeichnet

SCHWACH GEKOPPELTE ELEKTRONEN
(Unabhängig)



Wie Individuen in einer lockeren Menschenmenge, die sich frei bewegen.

STARK GEKOPPELTE ELEKTRONEN
(Korreliert)

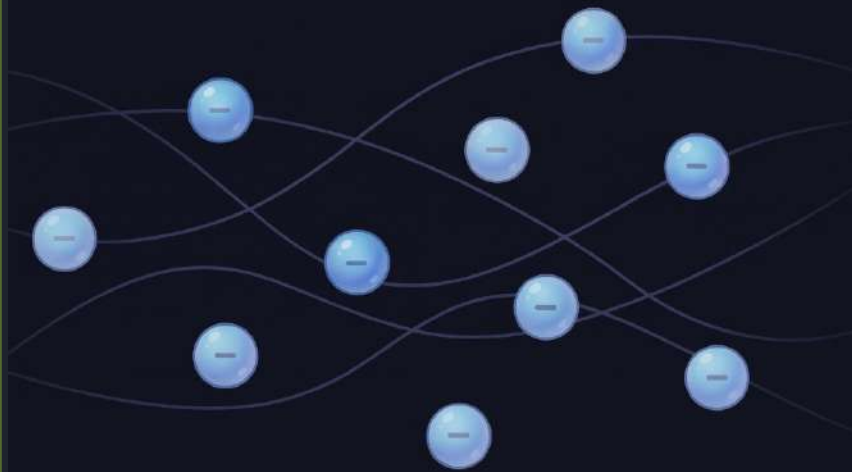


Wie ein dichter Moshpit, sind die Bewegungen verknüpft und kollektiv. ✨

Ähnliche Probleme suchen die Festkörperphysik heim, wo viele Teilchen zu Festkörpern oder Flüssigkeiten kondensieren.

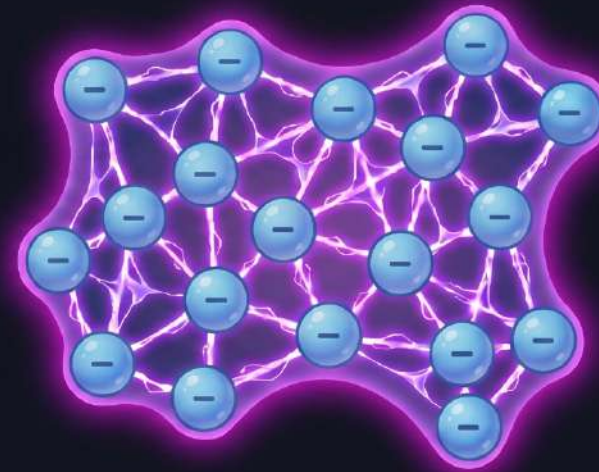
Hier werden nicht-perturbative starke Wechselwirkungen als *starke Korrelationen* bezeichnet

SCHWACH GEKOPPELTE ELEKTRONEN
(Unabhängig)



Wie Individuen in einer lockeren Menschenmenge, die sich frei bewegen.

STARK GEKOPPELTE ELEKTRONEN
(Korreliert)



Wie ein dichter Moshpit, sind die Bewegungen verknüpft und kollektiv. ✨

Stark-gekoppelte Elektronen zeigen
bemerkenswertes aber weitgehend mysteriöses Verhalten

Stark-gekoppelte Elektronen zeigen
bemerkenswertes aber weitgehend mysteriöses Verhalten

Quintanilla & Hooley 2009

Beitrag: Starke Korrelationen

physicsworld.com

Das Rätsel der starken Korrelationen

Eine Lösung für eines der berühmtesten Probleme der theoretischen Physik, das vor fast 50 Jahren formuliert wurde, könnte endlich in greifbarer Nähe sein.

Aber wie **Jorge Quintanilla** und **Chris Hooley** erklären, **beruht sie nicht auf Theorie,**

Stark-gekoppelte Elektronen zeigen
bemerkenswertes aber weitgehend mysteriöses Verhalten

Quintanilla & Hooley 2009

Beitrag: **Starke Korrelationen**

physicsworld.com

Das Rätsel der starken Korrelationen

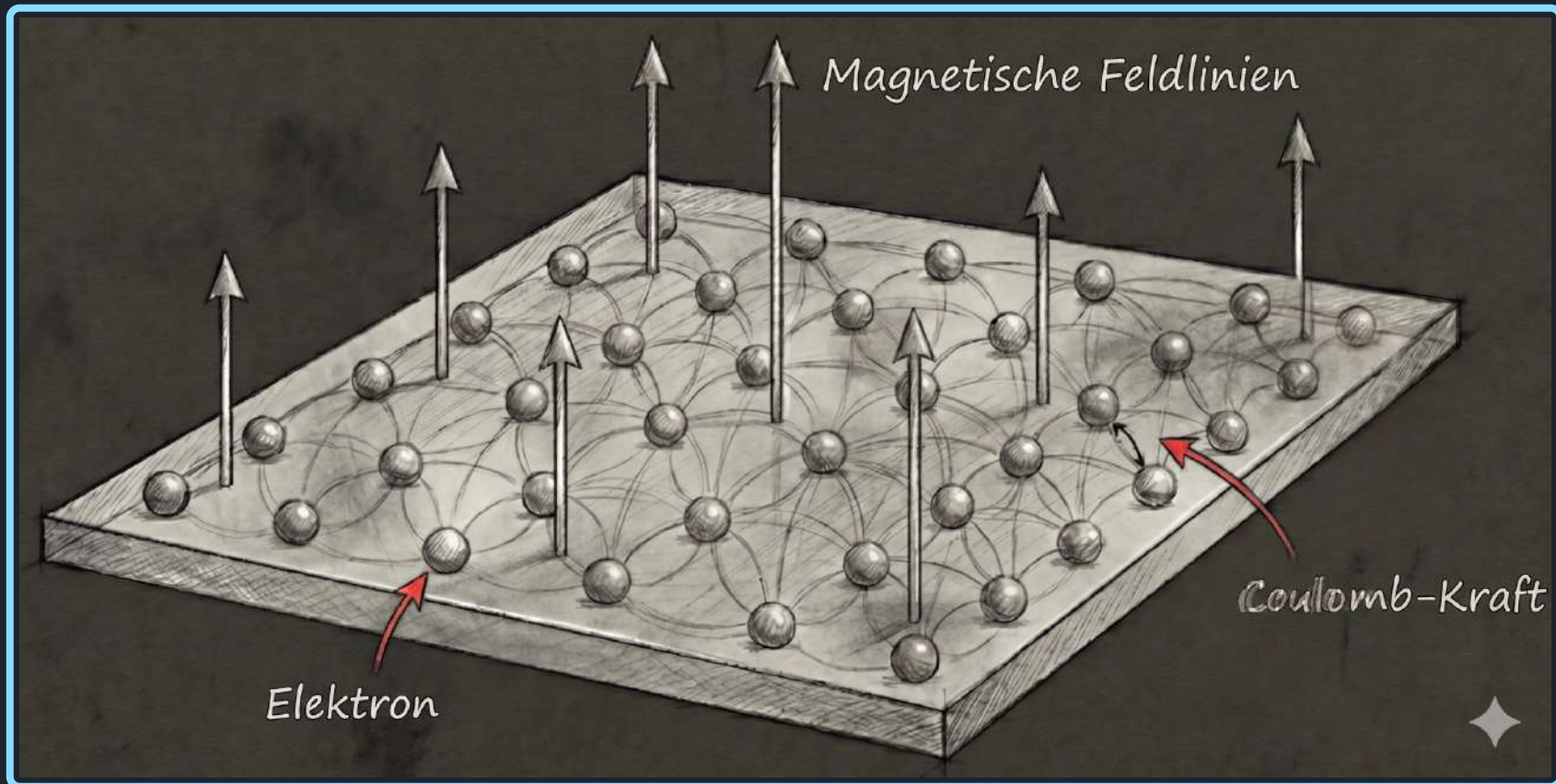
Eine Lösung für eines der berühmtesten Probleme der theoretischen Physik, das vor fast 50 Jahren formuliert wurde, könnte endlich in greifbarer Nähe sein.

Aber wie **Jorge Quintanilla** und **Chris Hooley** erklären, **beruht sie nicht auf Theorie,**

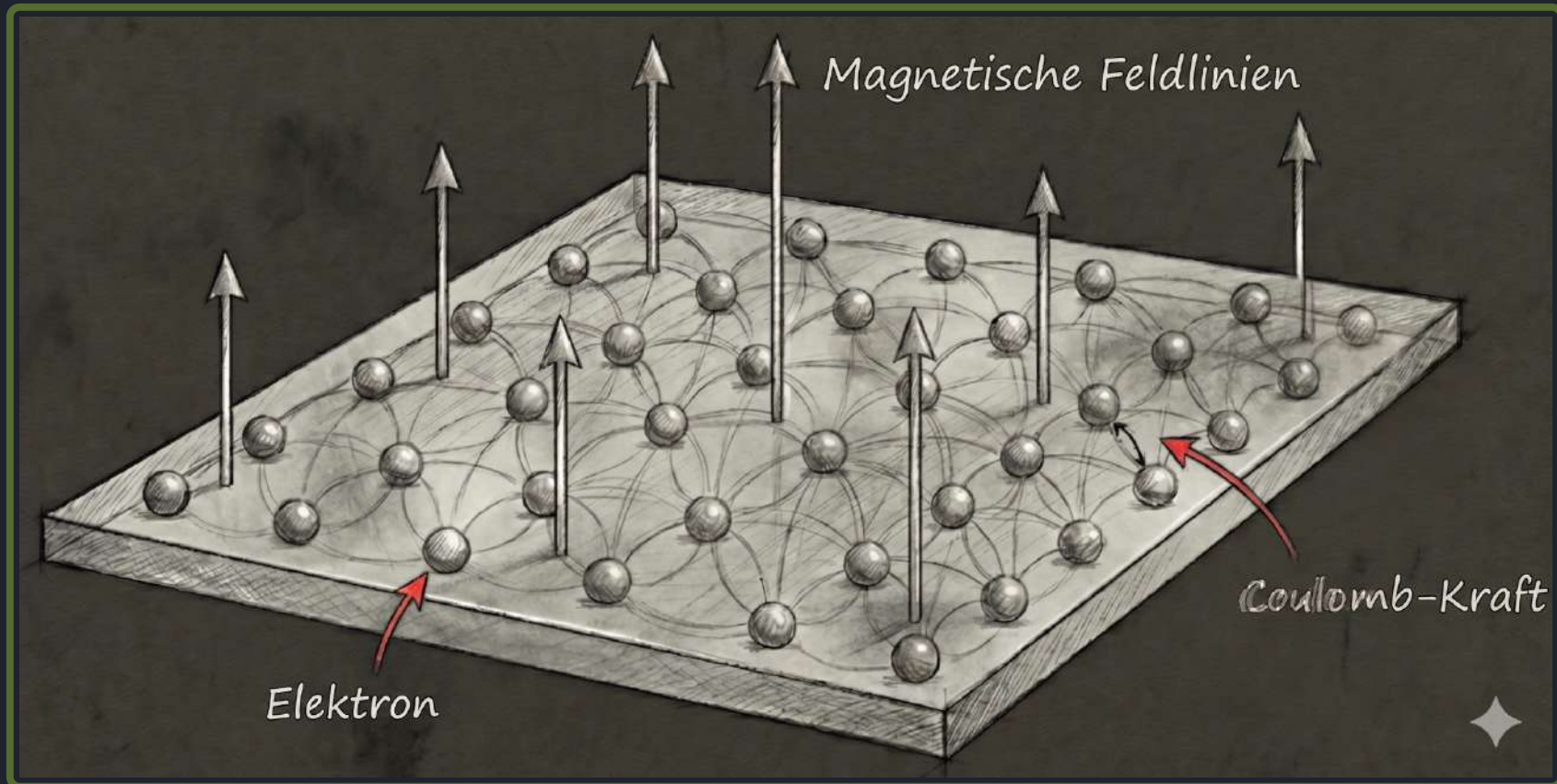
Zum Beispiel *Quanten Hall Systeme*

Zum Beispiel *Quanten Hall Systeme* sind
2D Elektronengase in transversalem magnetischem Feld

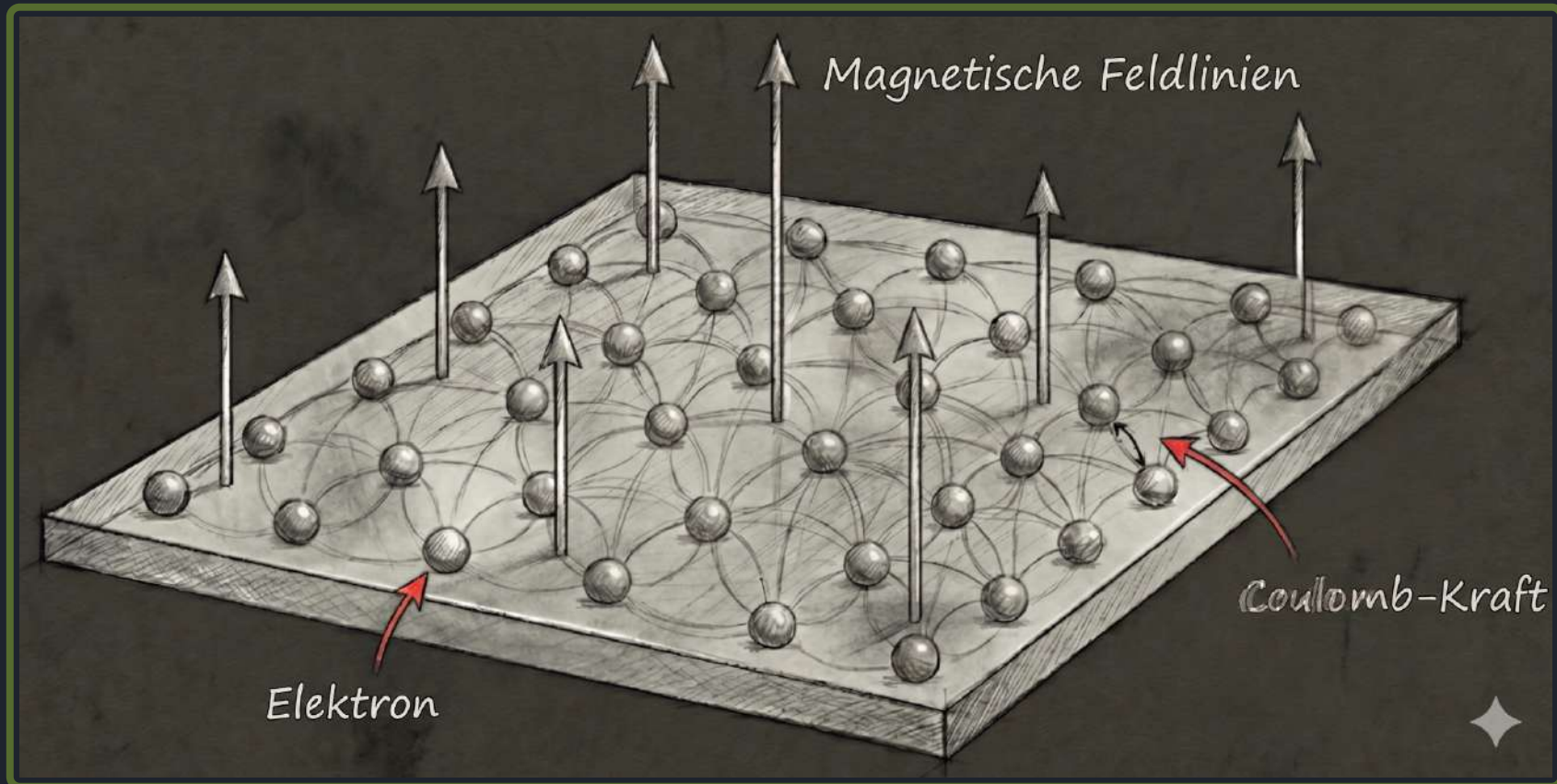
Zum Beispiel *Quanten Hall Systeme* sind
2D Elektronengase in transversalem magnetischem Feld



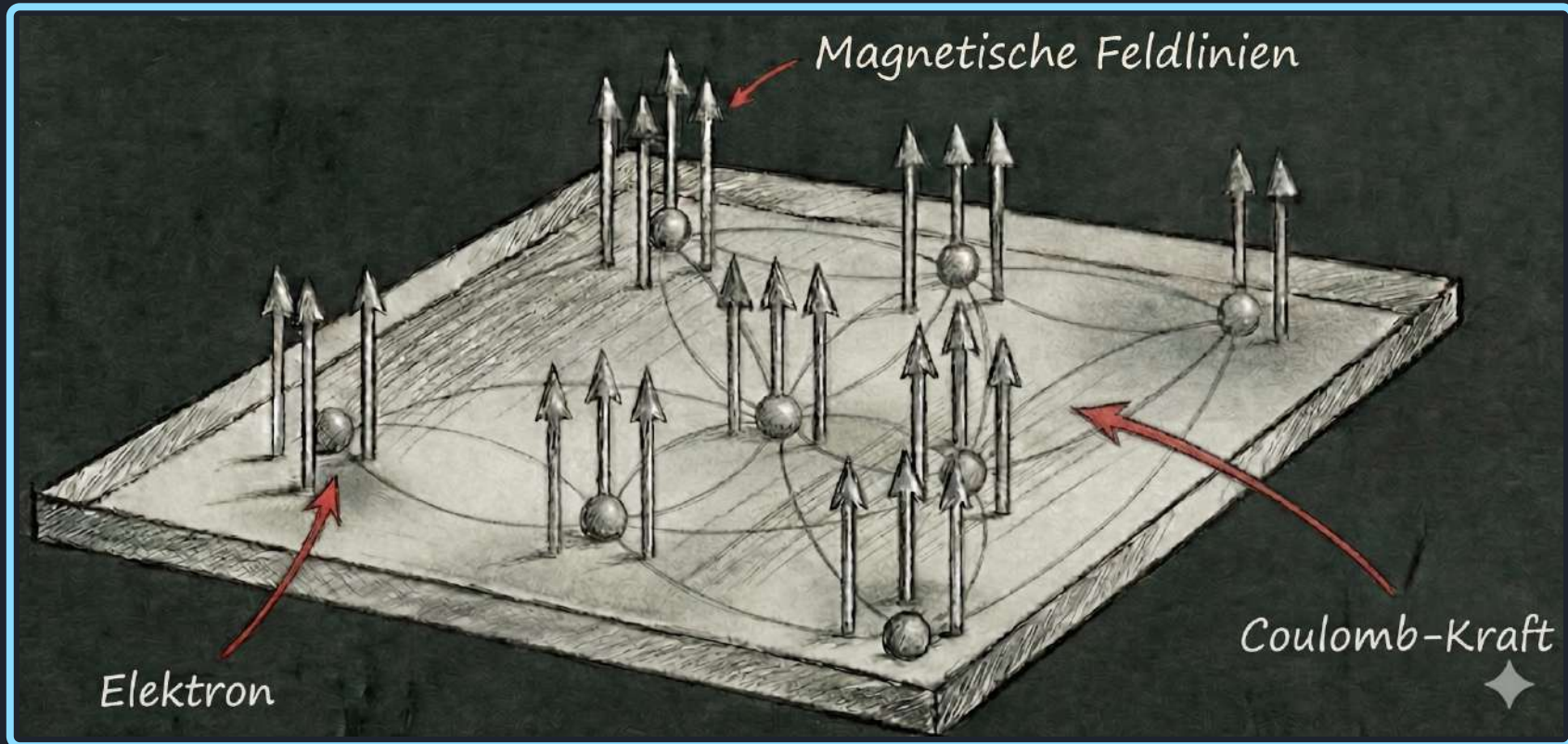
Zum Beispiel *Quanten Hall Systeme* sind
2D Elektronengase in transversalem magnetischem Feld



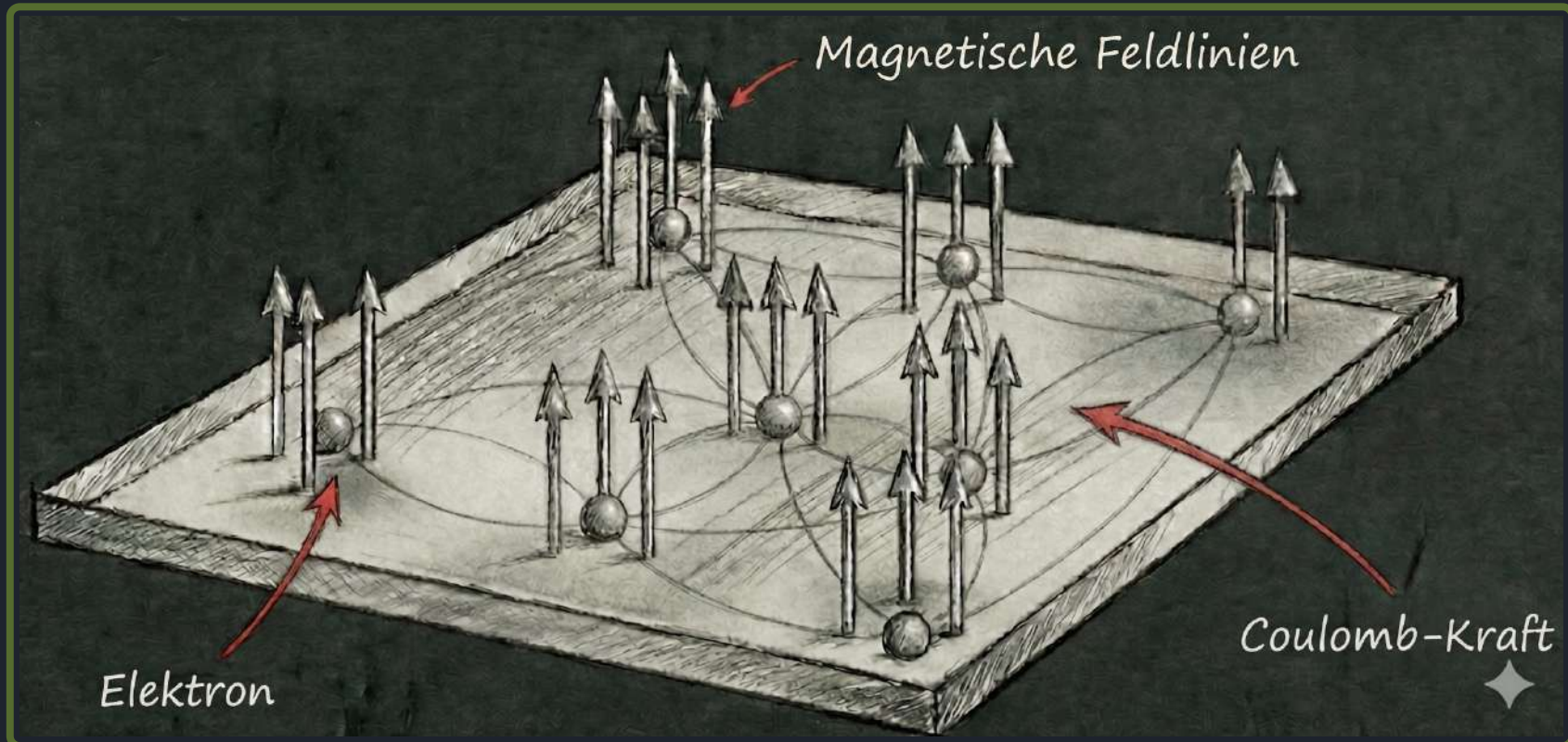
Etwas Bemerkenswertes passiert im Fall von genau k magnetischen Feldlinien pro Elektron



Etwas Bemerkenswertes passiert im Fall von genau k magnetischen Feldlinien pro Elektron

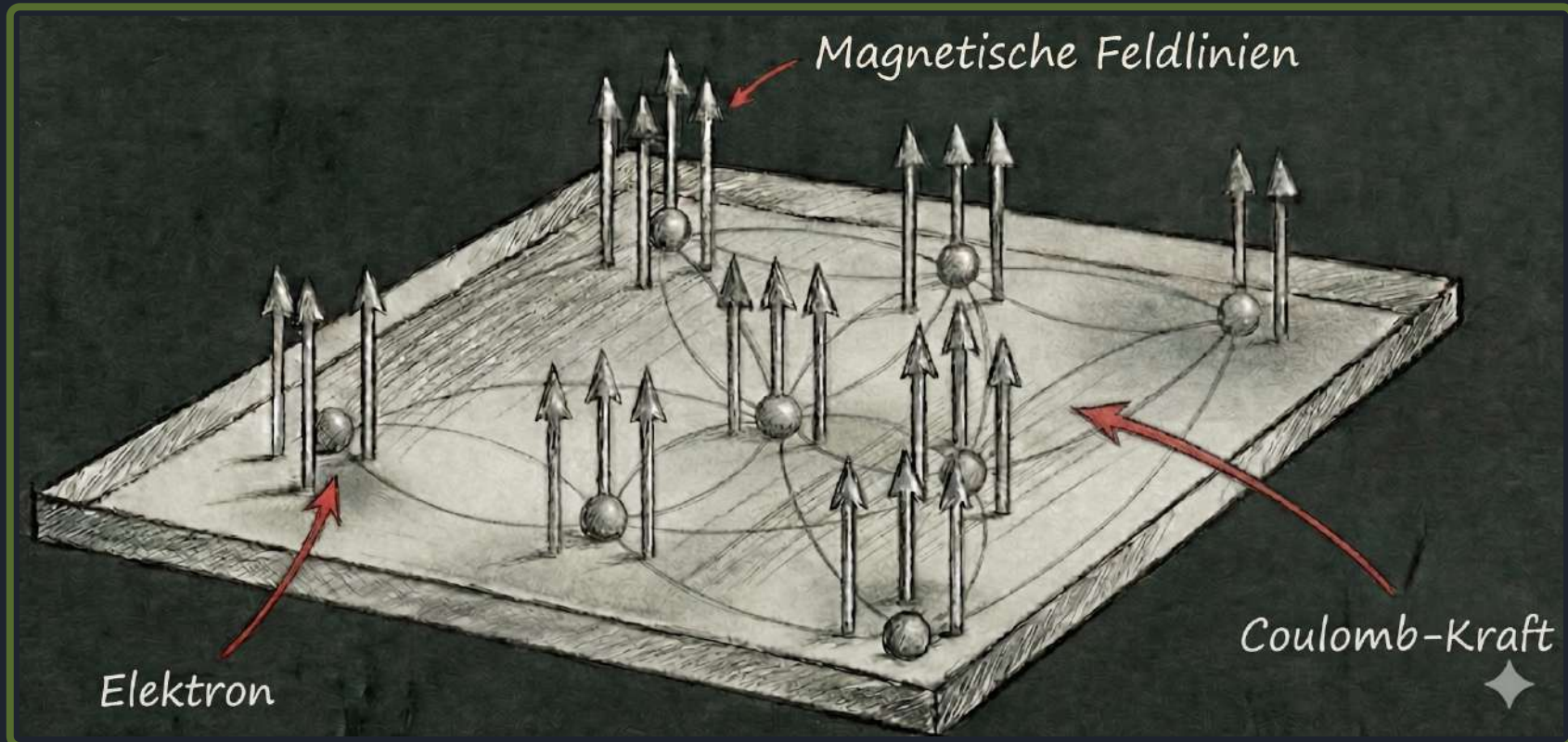


Etwas Bemerkenswertes passiert im Fall von genau k magnetischen Feldlinien pro Elektron



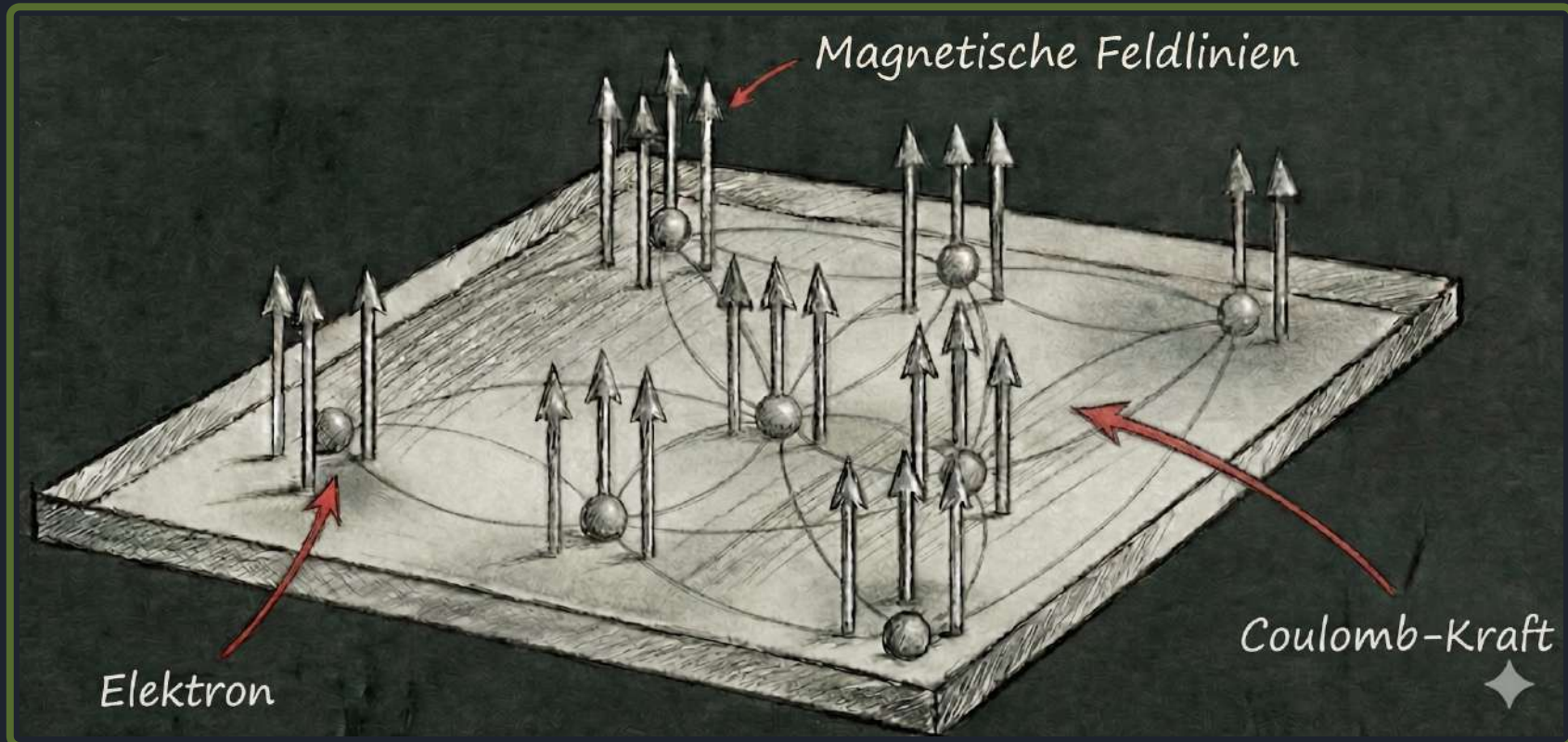
Genannt: *Fraktionale Quanten Hall* (FQH)
Gase mit *Füllfaktor* $\nu = 1/k$

Etwas Bemerkenswertes passiert im Fall von genau k magnetischen Feldlinien pro Elektron

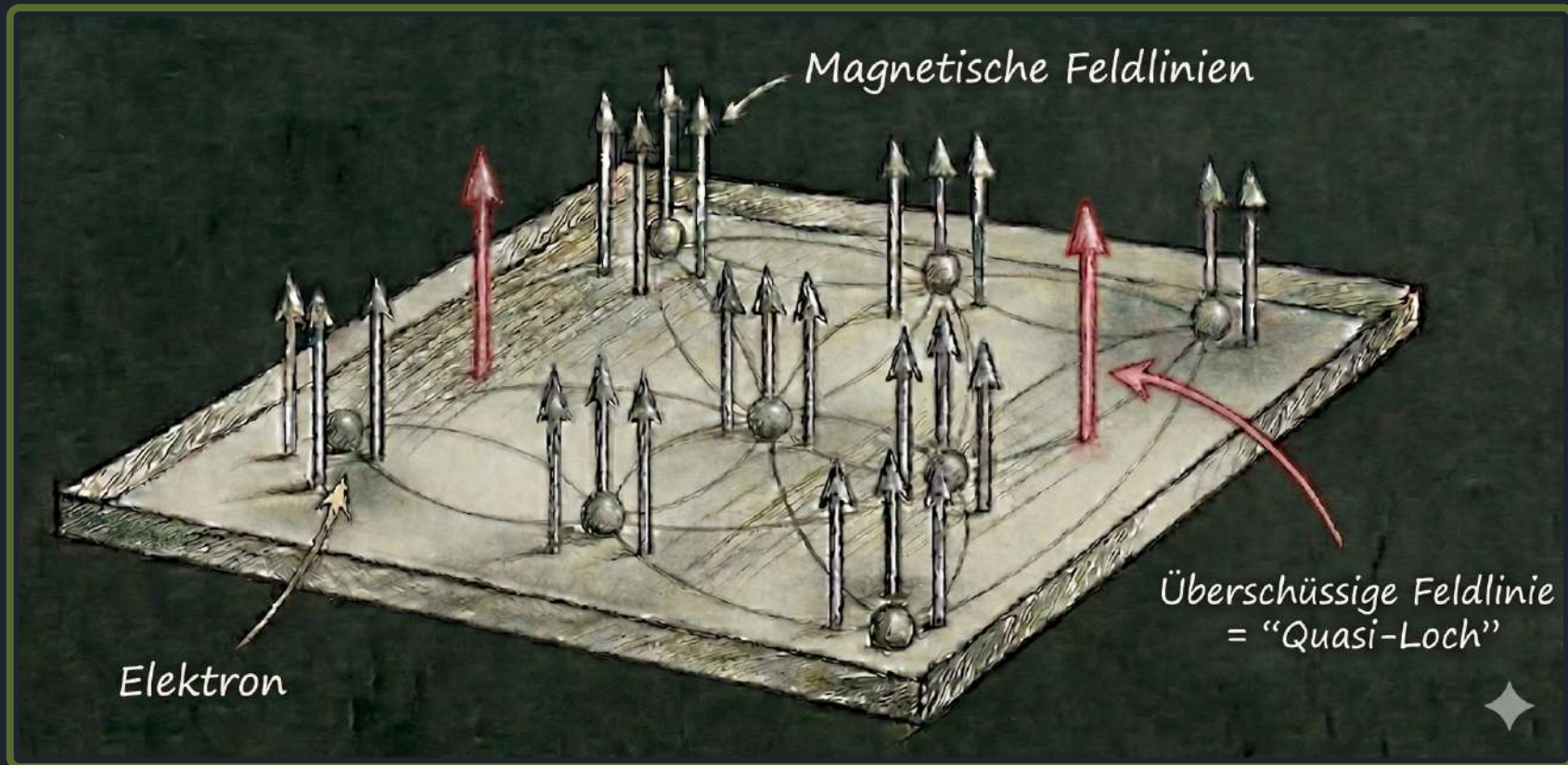


Genannt: *Fraktionale Quanten Hall* (FQH)
Gase mit *Füllfaktor* $\nu = 1/k$

Vor solchem Hintergrund wirkt jede zusätzliche Feldlinie
wie das Fehlen eines $1/k$ -tel Elektrons

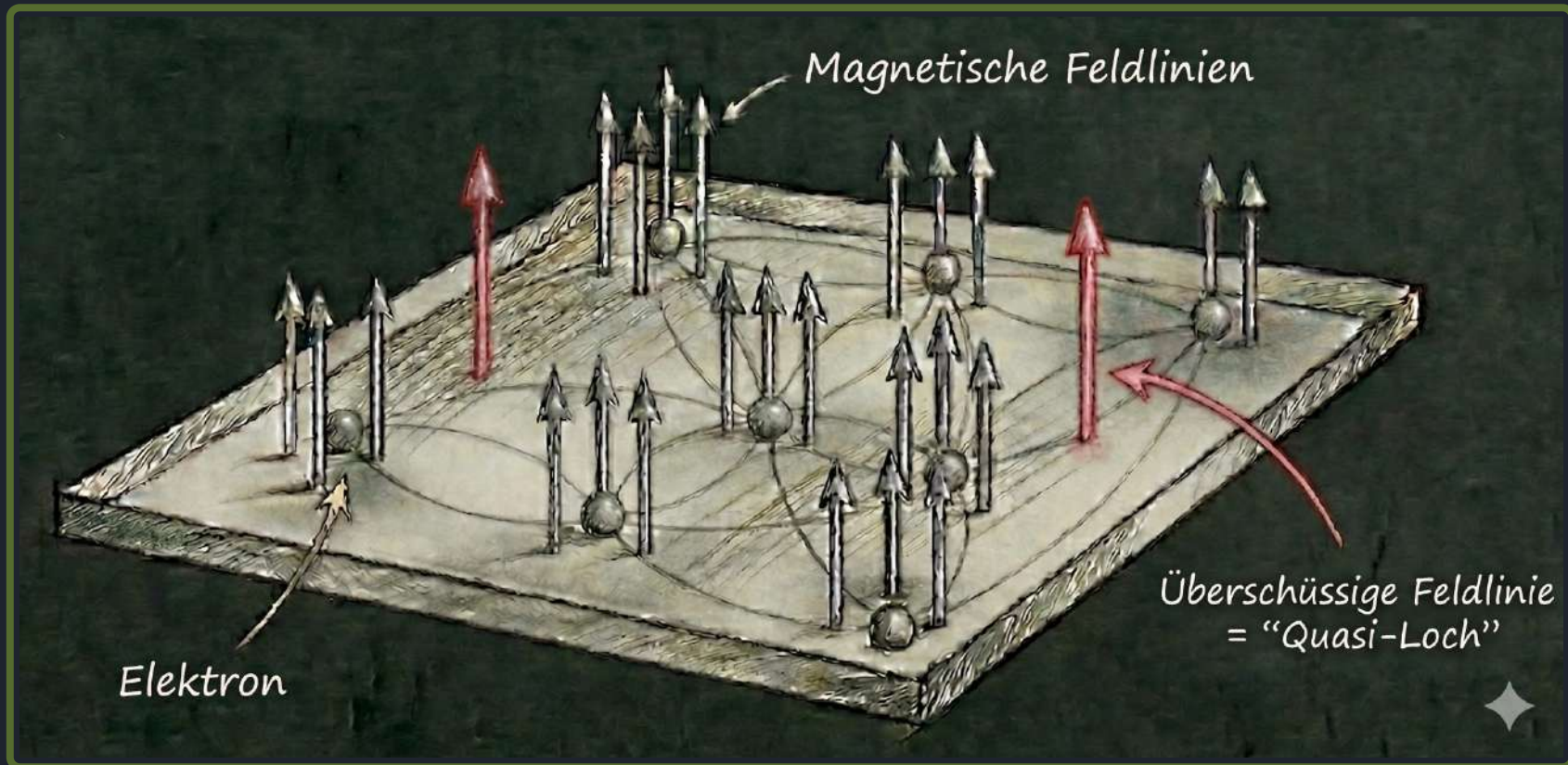


Vor solchem Hintergrund wirkt jede zusätzliche Feldlinie wie das Fehlen eines $1/k$ -tel Elektrons

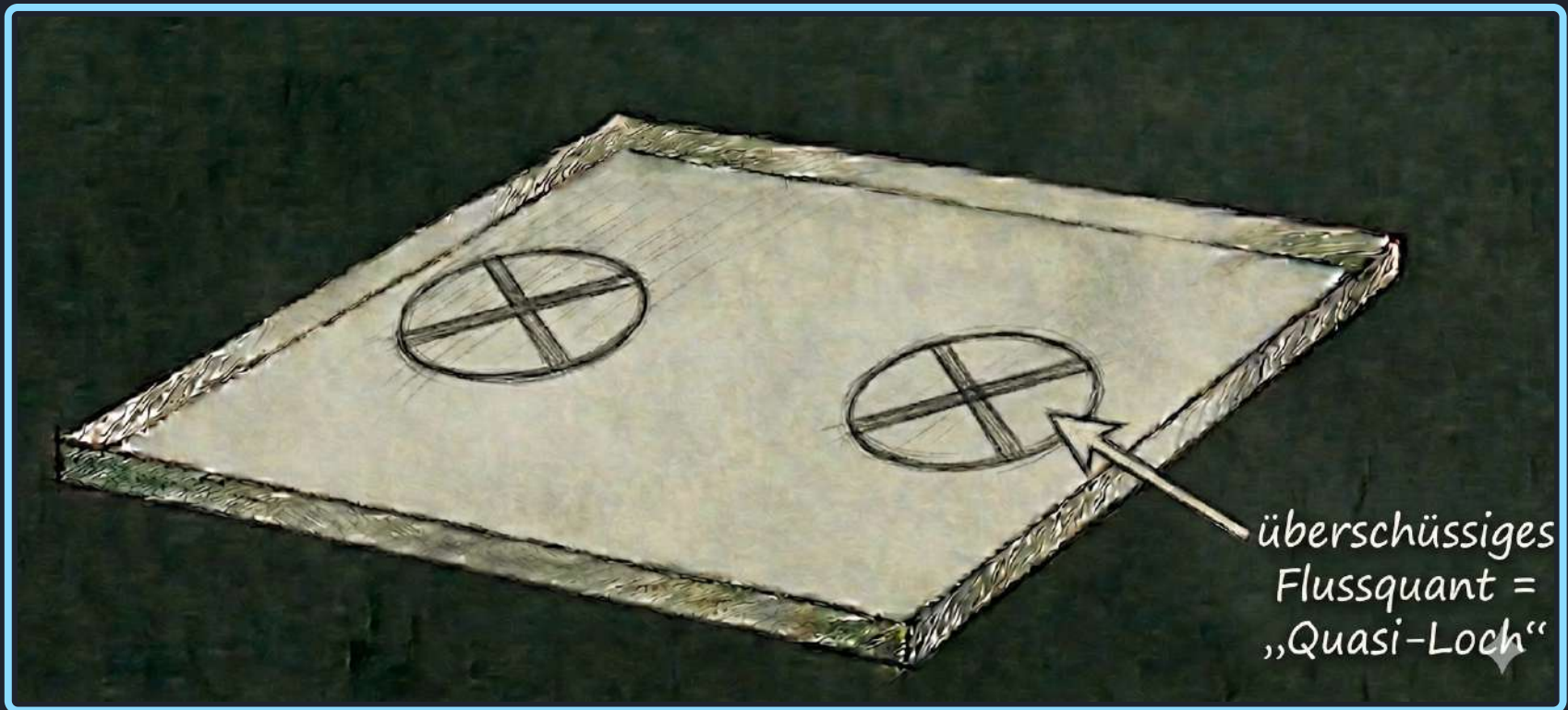


diese *Quasi-Löcher* erscheinen als fraktionale Quasi-Teilchen im FQH Gas.

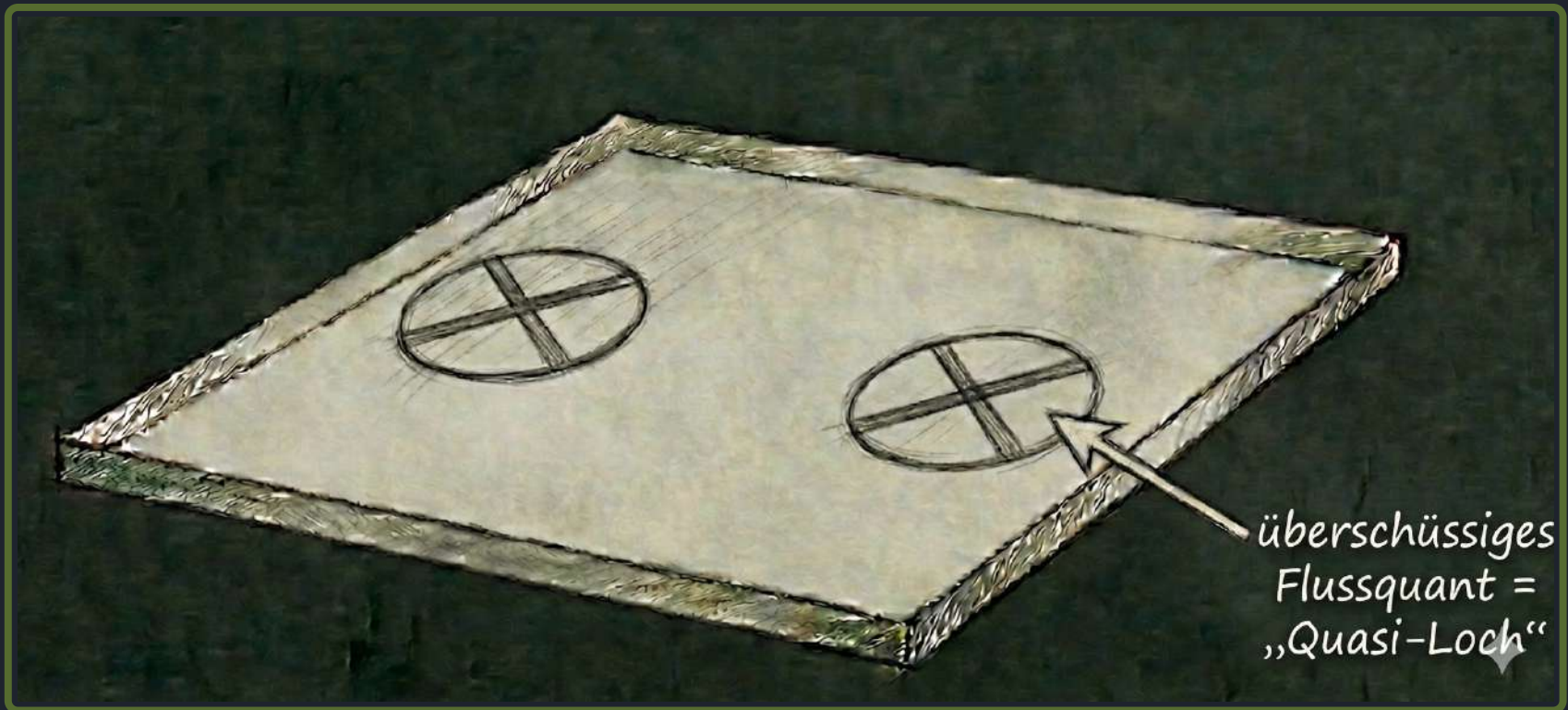
Vor solchem Hintergrund wirkt jede zusätzliche Feldlinie
wie das Fehlen eines $1/k$ -tel Elektrons



diese *Quasi-Löcher* erscheinen
als fraktionale Quasi-Teilchen im FQH Gas.

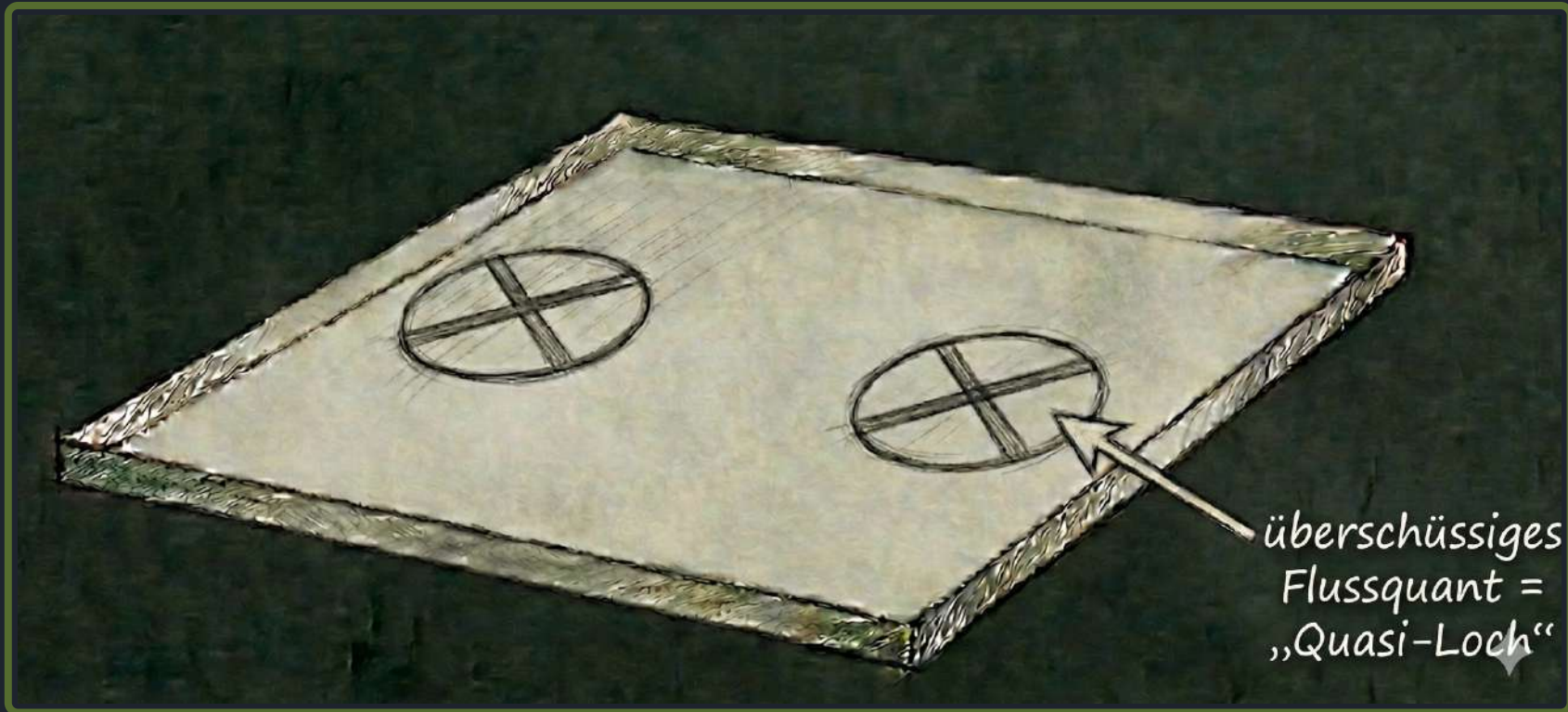


diese *Quasi-Löcher* erscheinen
als fraktionale Quasi-Teilchen im FQH Gas.



diese *Quasi-Löcher* erscheinen
als fraktionale Quasi-Teilchen im FQH Gas.

Diese haben die bemerkenswerte Eigenschaft,
dass die *Verzopfung* ihrer Weltlinien...



Diese haben die bemerkenswerte Eigenschaft,
dass die *Verzopfung* ihrer Weltlinien...



Diese haben die bemerkenswerte Eigenschaft,
dass die *Verzopfung* ihrer Weltlinien...



... den Quantenzustand um eine Phase ändert,

Diese haben die bemerkenswerte Eigenschaft,
dass die *Verzopfung* ihrer Weltlinien...



... den Quantenzustand um eine Phase ändert,
welche nur von der Verzopfung/Verknotung abhängt

Diese haben die bemerkenswerte Eigenschaft,
dass die *Verzopfung* ihrer Weltlinien...

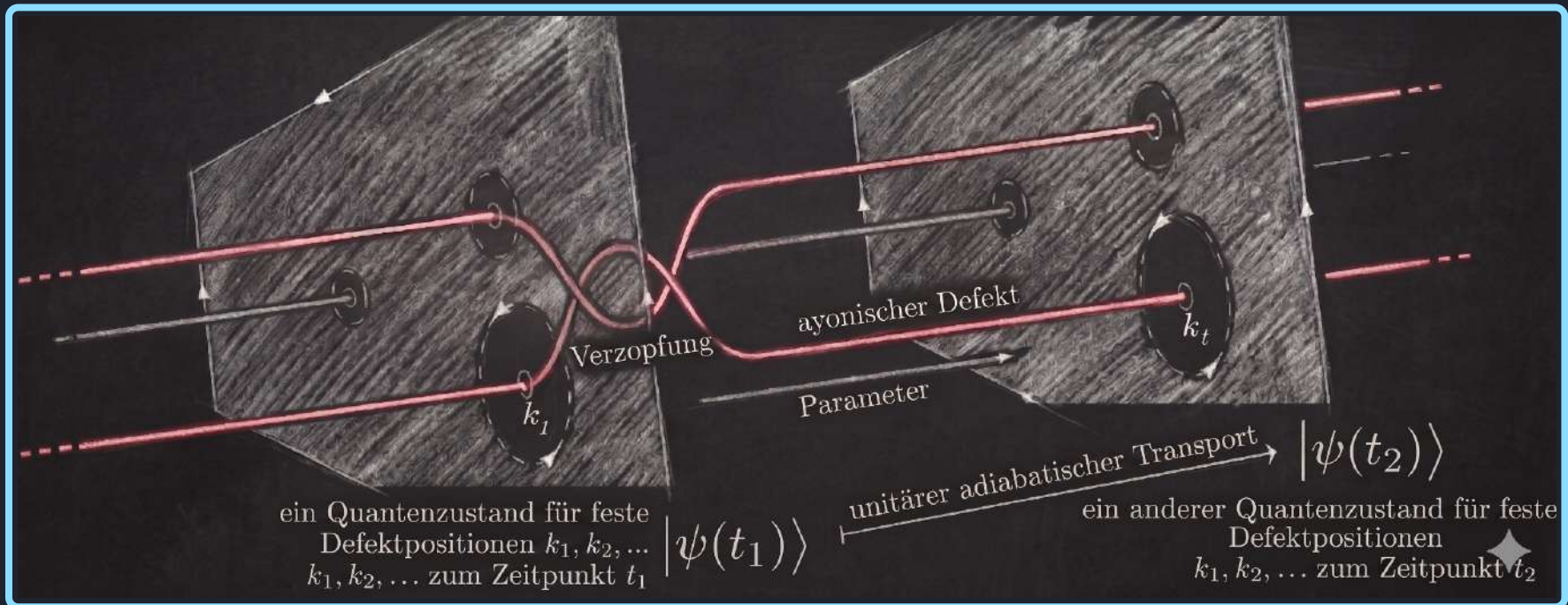


... den Quantenzustand um eine Phase ändert,
welche nur von der Verzopfung/Verknotung abhängt

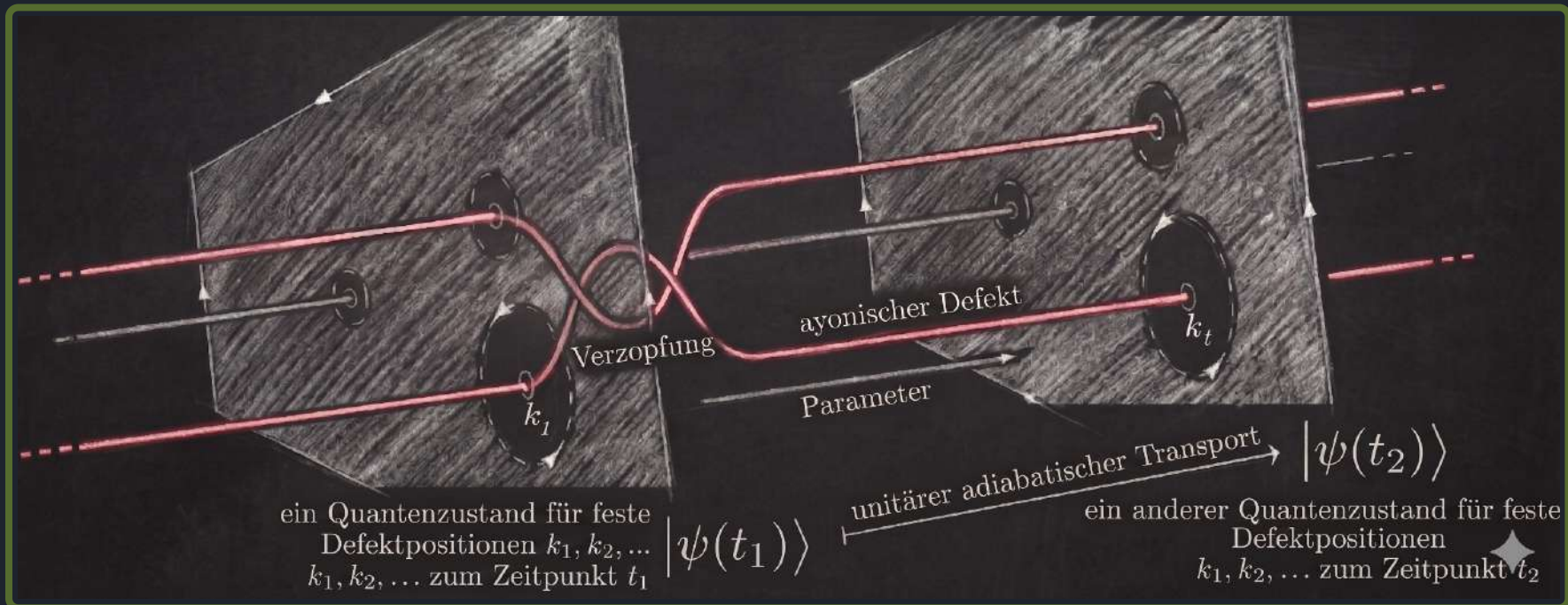
Diese Prozesse können dienen als
topologische Quantengatter



Diese Prozesse können dienen als
topologische Quantengatter

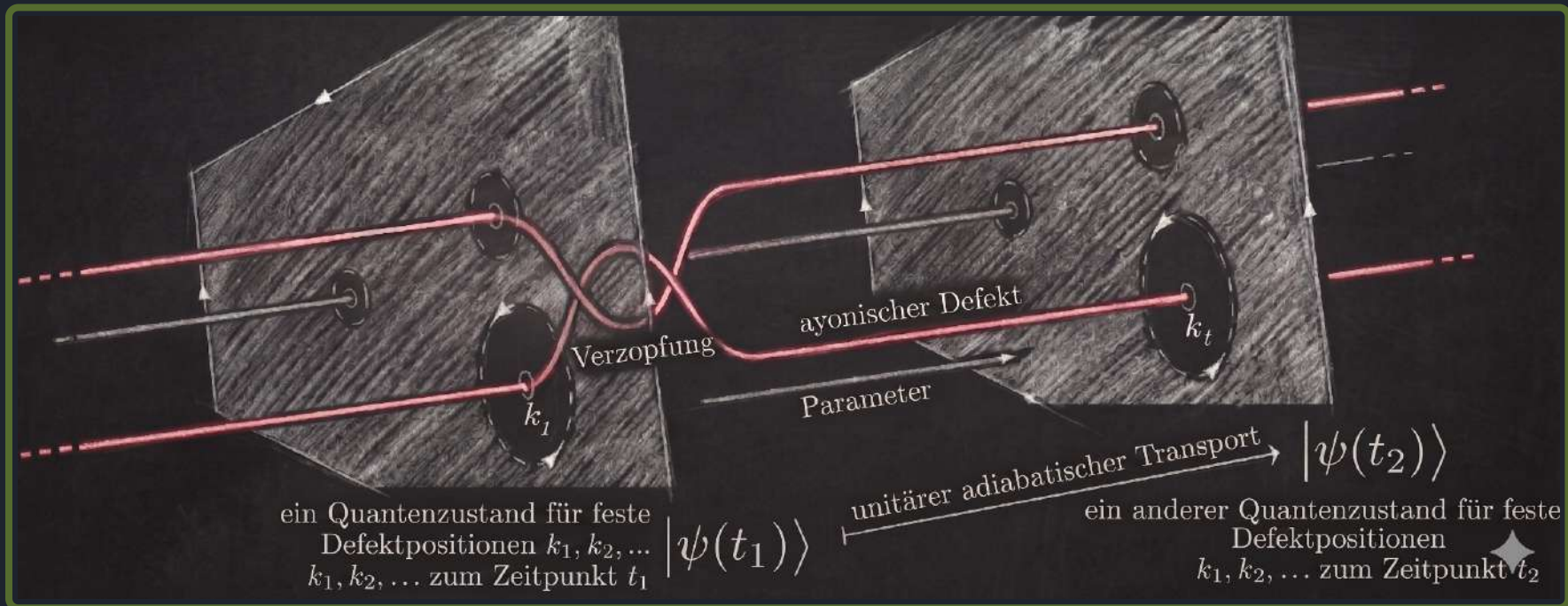


Diese Prozesse können dienen als
topologische Quantengatter



aber einen Schritt zurück: Was sind Quantencomputer?

Diese Prozesse können dienen als
topologische Quantengatter



aber einen Schritt zurück: Was sind Quantencomputer?

Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

Quantenzustand: probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$

Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

Quantenzustand: probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$

Quantengatter: kontrollierte Transformation von Quantenzuständen $\mathcal{H} \xrightarrow{U} \mathcal{H}'$
 $|\psi\rangle \mapsto |\psi'\rangle$

Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

Quantenzustand: probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$

Quantengatter: kontrollierte Transformation von Quantenzuständen $\mathcal{H} \xrightarrow{U} \mathcal{H}'$
 $|\psi\rangle \mapsto |\psi'\rangle$

Quantenschaltkreis: algorithmische Kombination von Quantengattern $\mathcal{H}_1 \longrightarrow \mathcal{H}_2$
 $\mathcal{H}_3 \cdots \cdots \cdots \longrightarrow$

Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

<i>Quantenzustand:</i>	probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie	$ \psi\rangle \in \mathcal{H}$
<i>Quantengatter:</i>	kontrollierte Transformation von Quantenzuständen	$\mathcal{H} \xrightarrow{U} \mathcal{H}'$ $ \psi\rangle \mapsto \psi'\rangle$
<i>Quantenschaltkreis:</i>	algorithmische Kombination von Quantengattern	$\mathcal{H}_1 \longrightarrow \mathcal{H}_2$ $\mathcal{H}_3 \cdots \cdots \cdots \longrightarrow$
<i>Quantencomputer:</i>	Quantenschaltkreis dessen Ausgabe eine Rechnung ist	$ x\rangle \mapsto f(x)\rangle$

Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

<i>Quantenzustand:</i>	probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie	$ \psi\rangle \in \mathcal{H}$
<i>Quantengatter:</i>	kontrollierte Transformation von Quantenzuständen	$\mathcal{H} \xrightarrow{U} \mathcal{H}'$ $ \psi\rangle \mapsto \psi'\rangle$
<i>Quantenschaltkreis:</i>	algorithmische Kombination von Quantengattern	$\mathcal{H}_1 \longrightarrow \mathcal{H}_2$ $\mathcal{H}_3 \cdots \cdots \cdots \longrightarrow$
<i>Quantencomputer:</i>	Quantenschaltkreis dessen Ausgabe eine Rechnung ist	$ x\rangle \mapsto f(x)\rangle$

Für bestimmte Aufgaben wären Quantencomputer viel mächtiger als klassische Computer

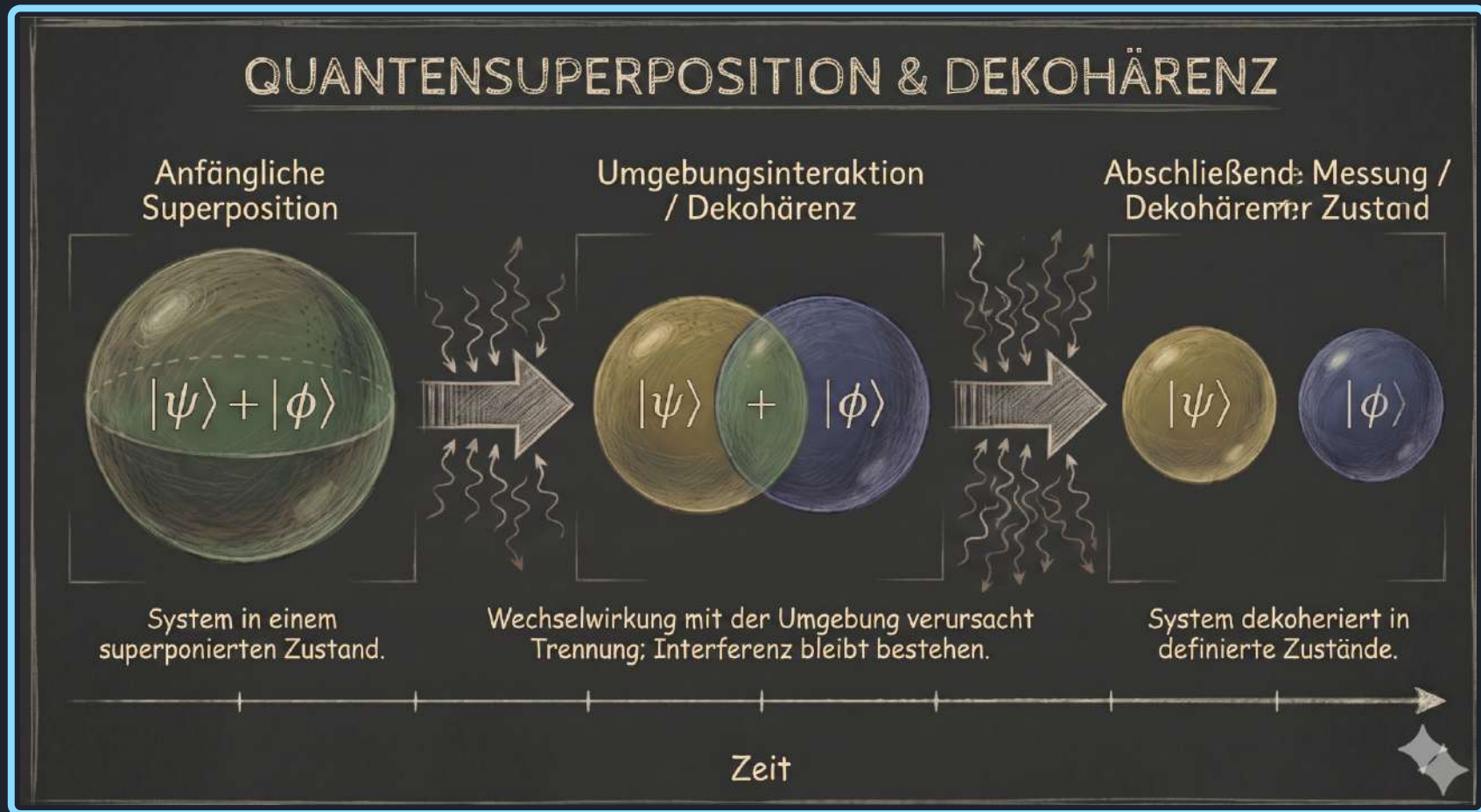
Schnellkurs zum Prinzip von Quantencomputern

<i>Quantenzustand:</i>	probabilistischer Zustand von nanoskopischer Materie	$ \psi\rangle \in \mathcal{H}$
<i>Quantengatter:</i>	kontrollierte Transformation von Quantenzuständen	$\mathcal{H} \xrightarrow{U} \mathcal{H}'$ $ \psi\rangle \mapsto \psi'\rangle$
<i>Quantenschaltkreis:</i>	algorithmische Kombination von Quantengattern	$\mathcal{H}_1 \longrightarrow \mathcal{H}_2$ $\mathcal{H}_3 \cdots \cdots \cdots \longrightarrow$
<i>Quantencomputer:</i>	Quantenschaltkreis dessen Ausgabe eine Rechnung ist	$ x\rangle \mapsto f(x)\rangle$

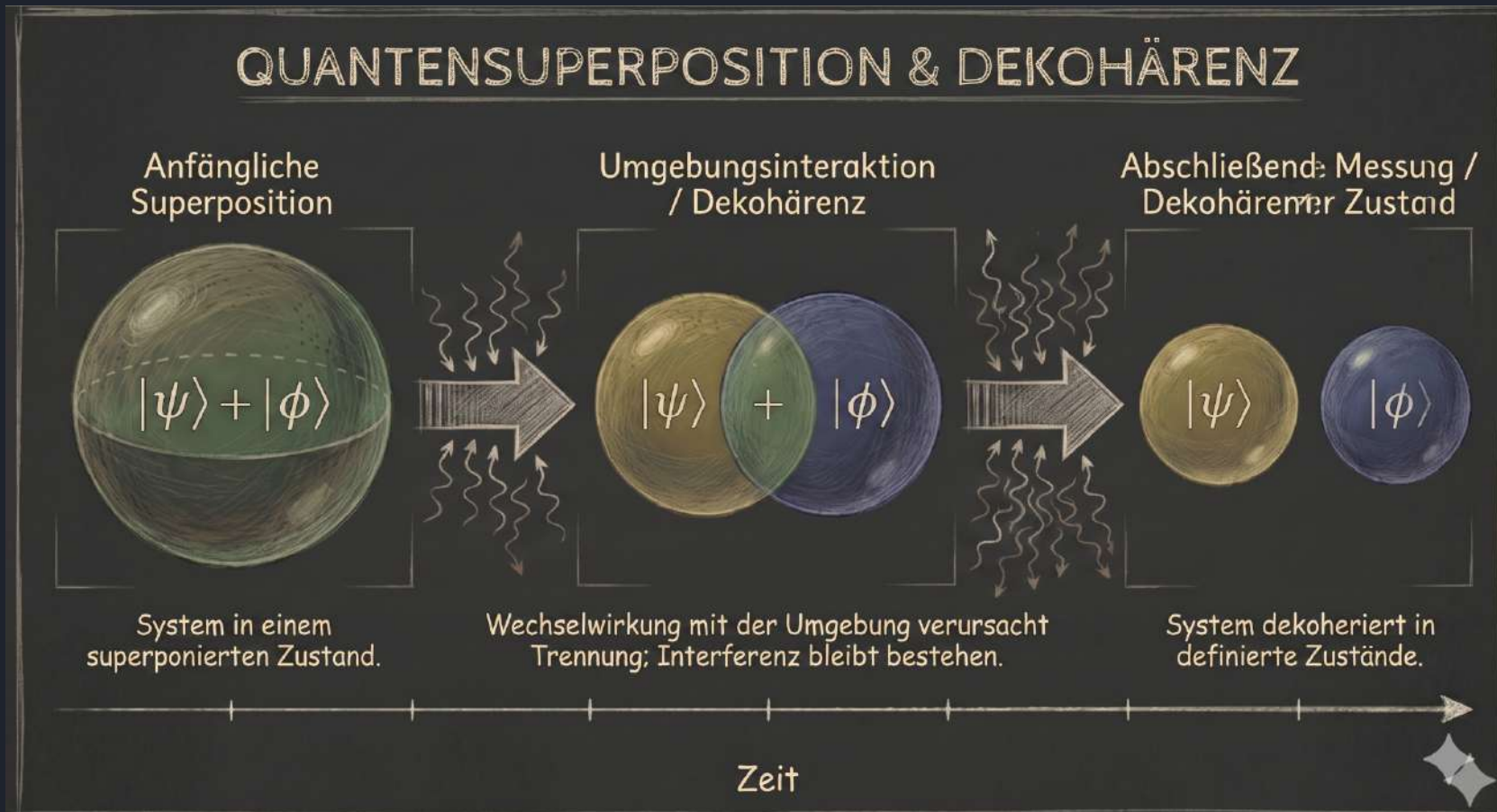
Für bestimmte Aufgaben wären Quantencomputer viel mächtiger als klassische Computer – **im Prinzip.**

Die größte Hürde für Quantencomputer
ist der Zerfall des Quantenzustandes (“Dekohärenz”).

Die größte Hürde für Quantencomputer ist der Zerfall des Quantenzustandes (“Dekohärenz”).

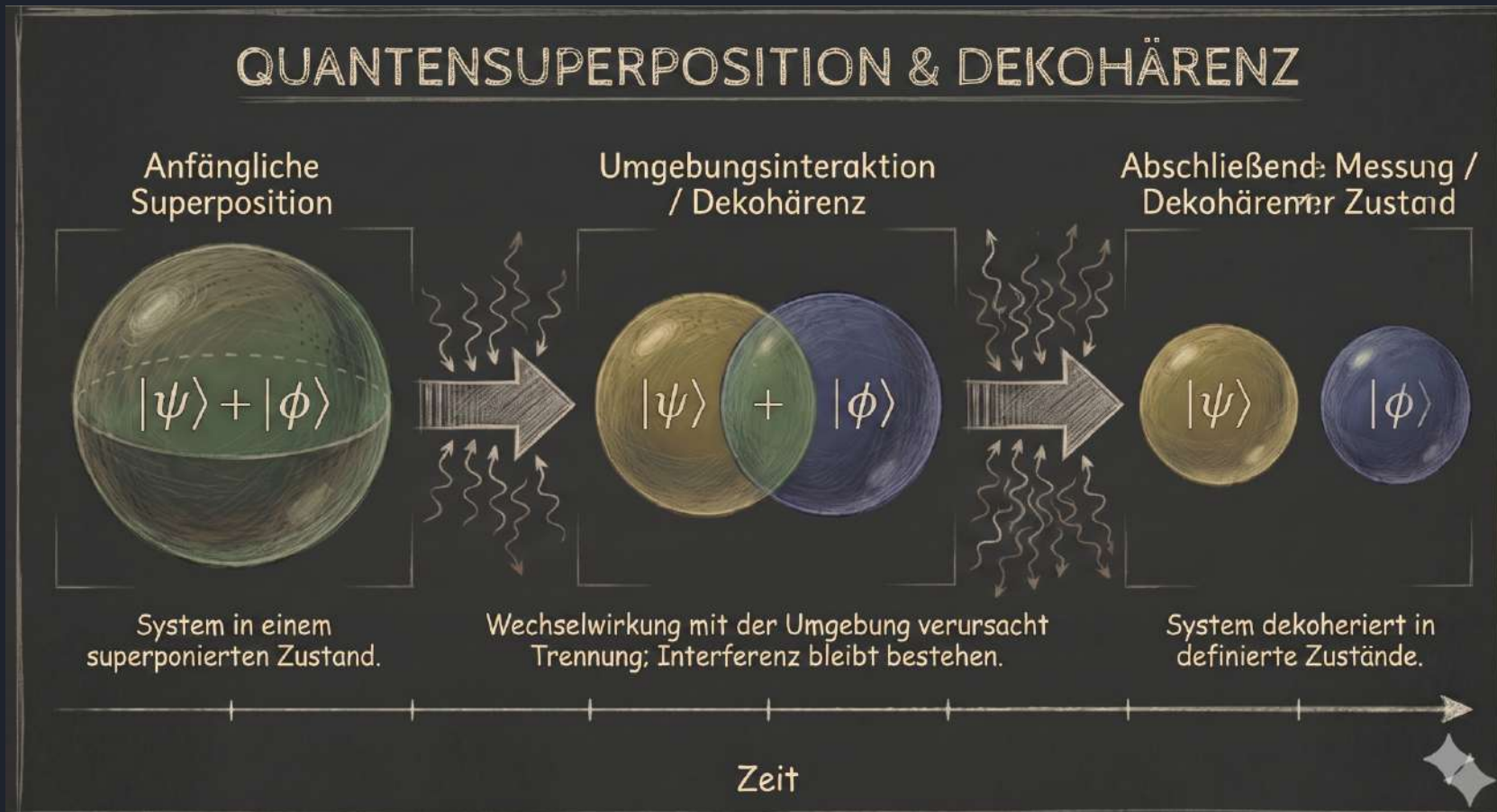


Die größte Hürde für Quantencomputer ist der Zerfall des Quantenzustandes (“Dekohärenz”).



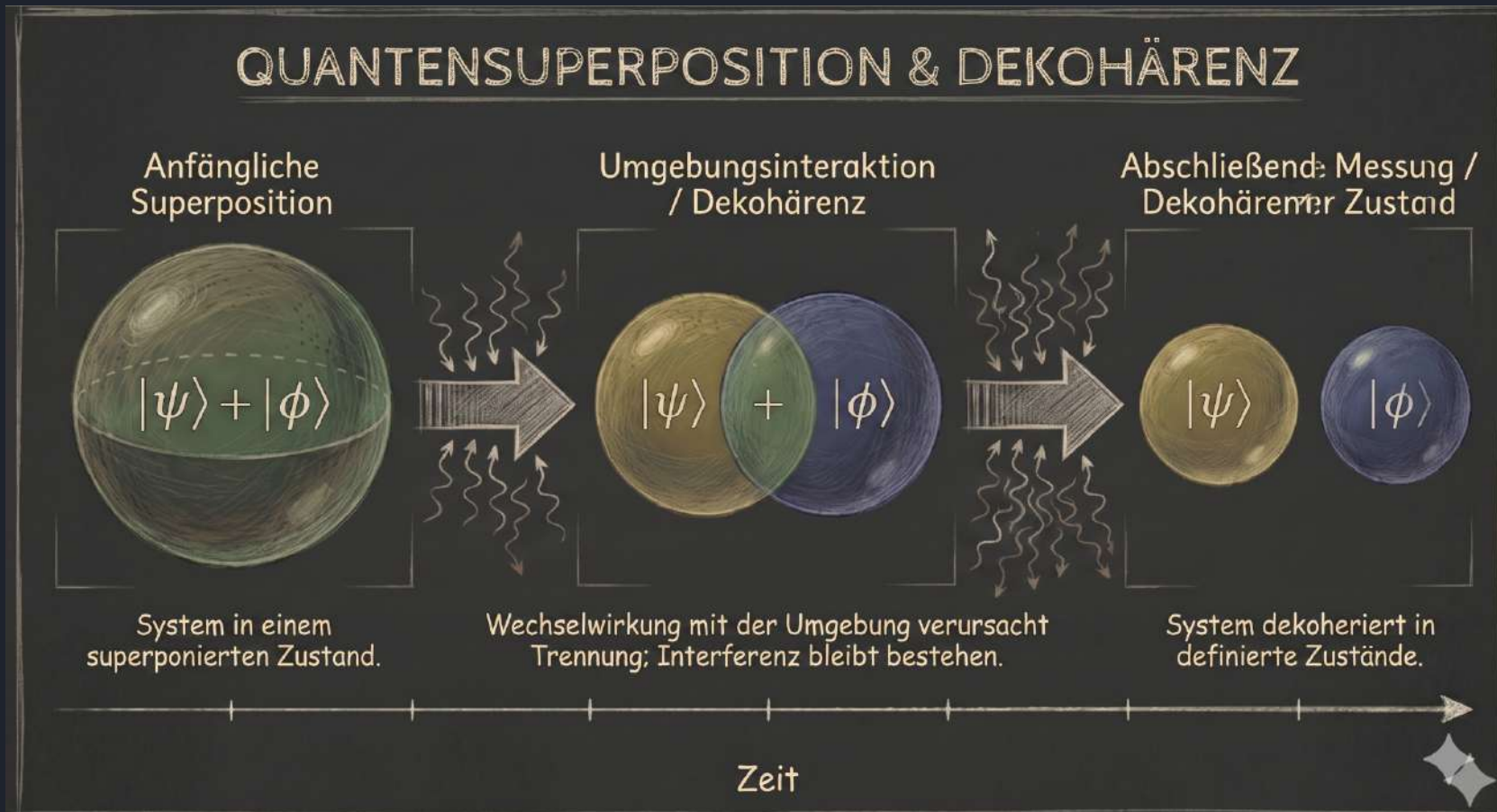
Die Leistung von Quantencomputern rührt her von *Überlagerung* von Quantenzuständen,

Die größte Hürde für Quantencomputer ist der Zerfall des Quantenzustandes (“Dekohärenz”).



Die Leistung von Quantencomputern rührt her von *Überlagerung* von Quantenzuständen, aber diese wird leicht zerstört durch Wechselwirkungen mit der Umgebung

Die größte Hürde für Quantencomputer ist der Zerfall des Quantenzustandes (“Dekohärenz”).



Die Leistung von Quantencomputern rührt her von *Überlagerung* von Quantenzuständen, aber diese wird leicht zerstört durch Wechselwirkungen mit der Umgebung

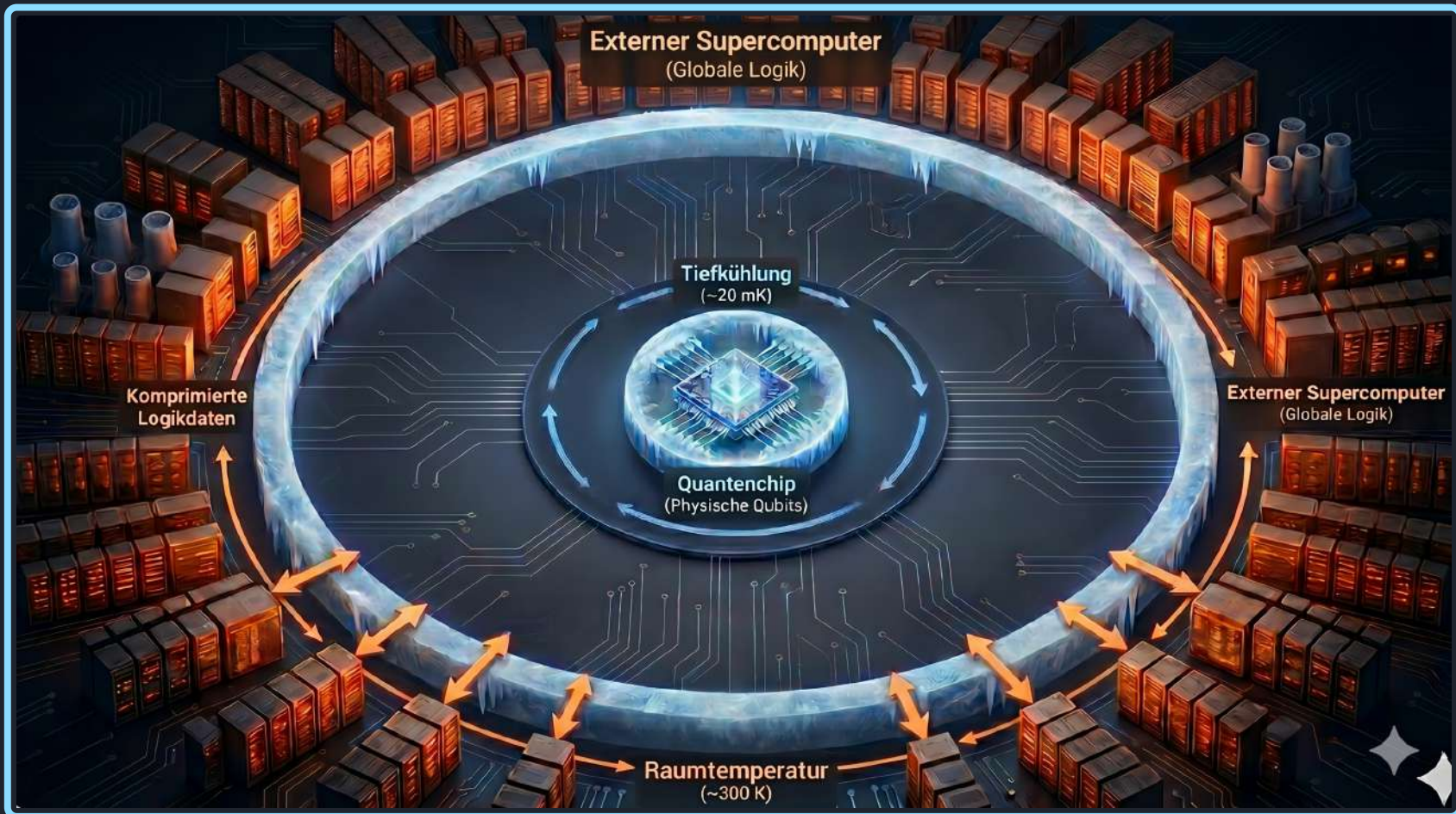
Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):

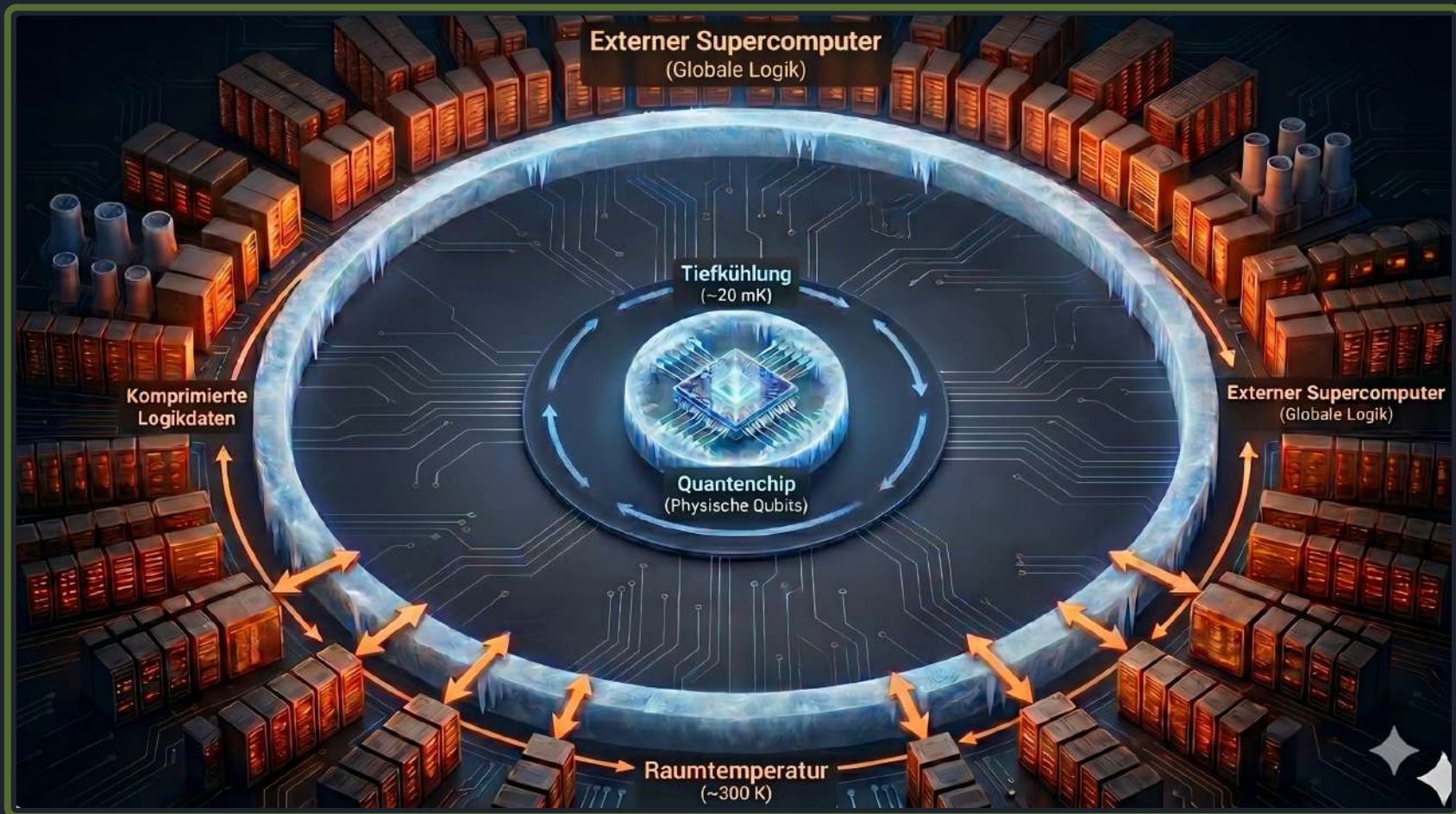
Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):



Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

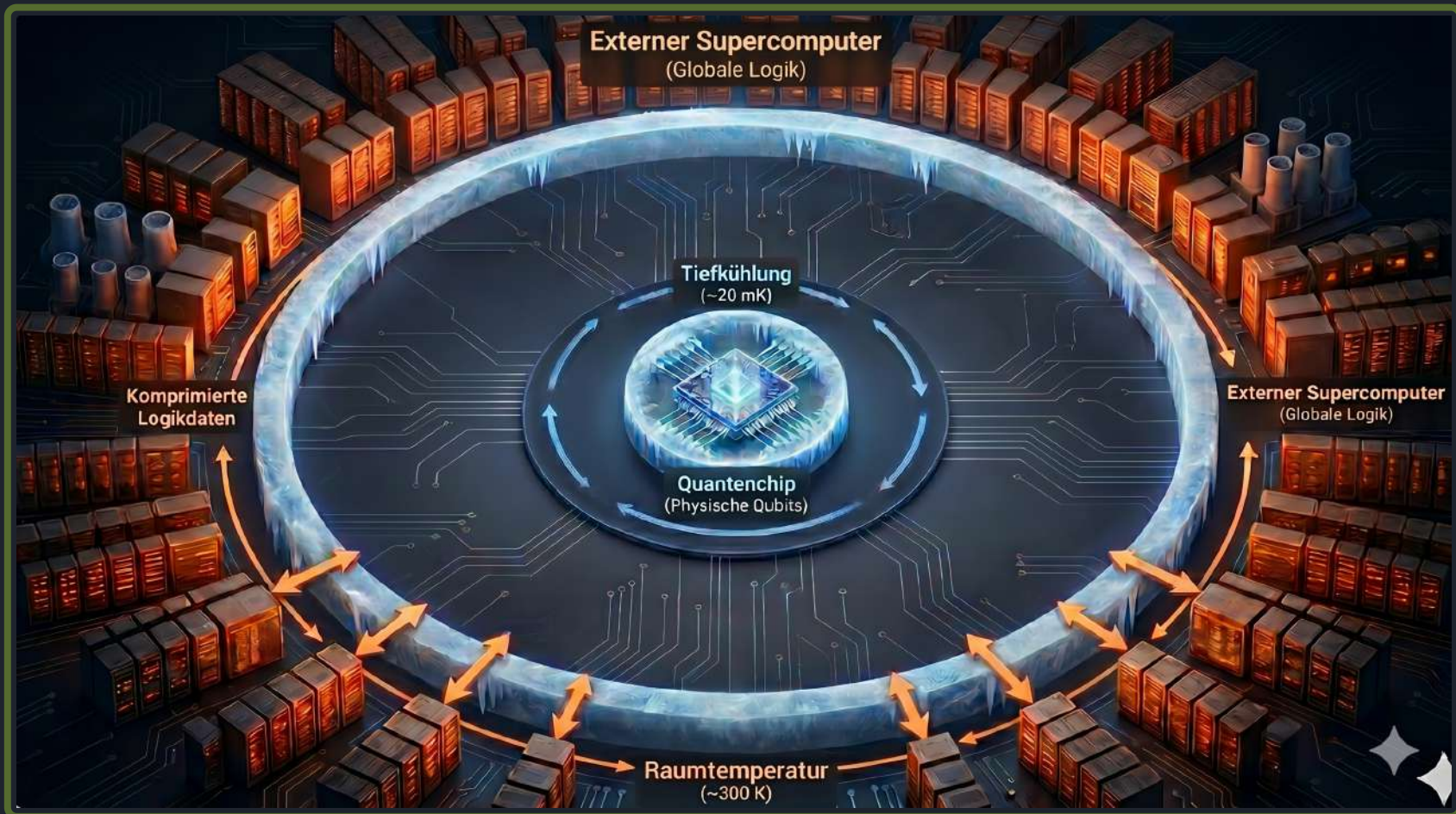
Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):



QEC alleine wird neuartige klassische *Supercomputer* benötigen

Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

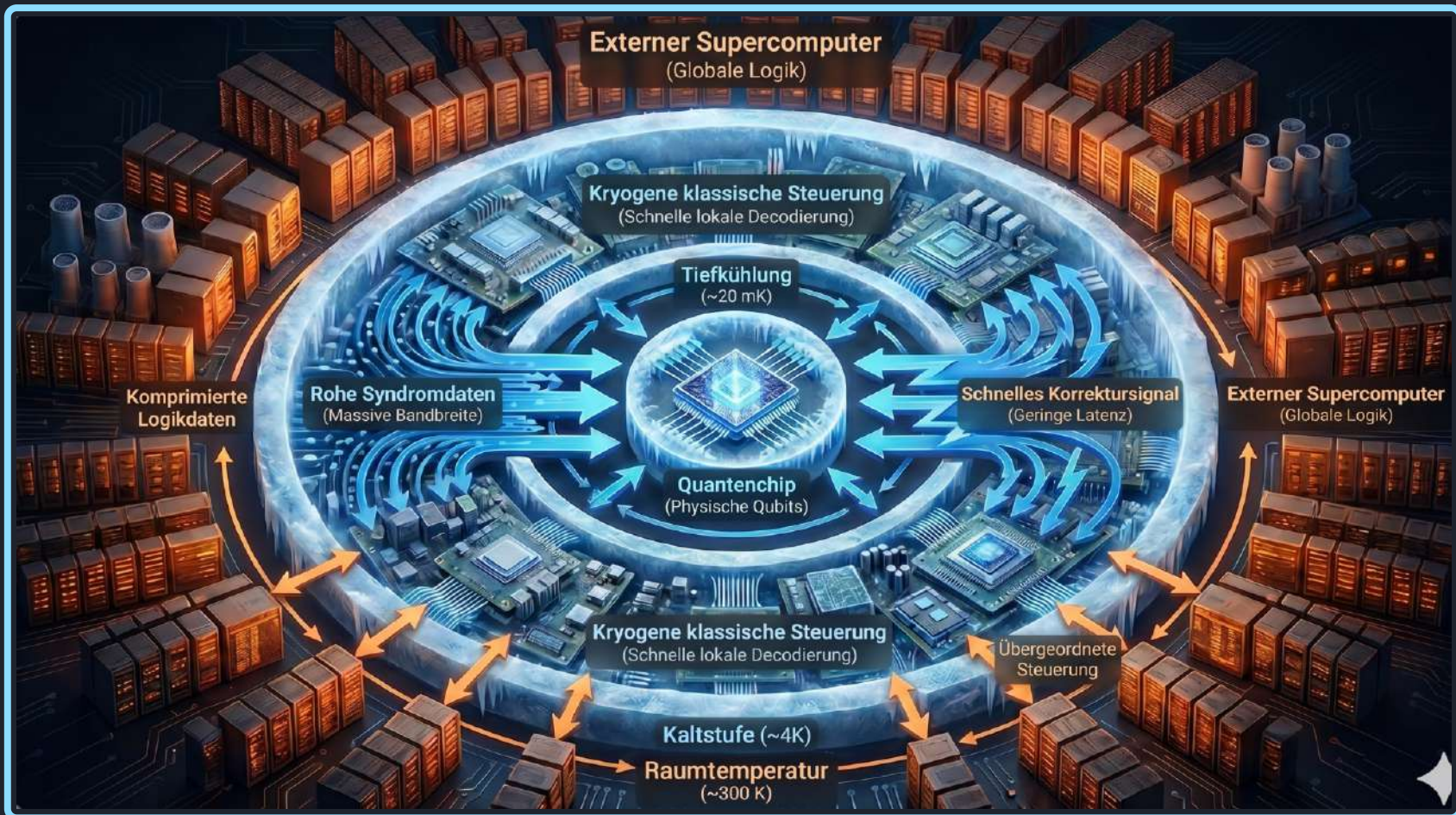
Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):



QEC alleine wird neuartige klassische *Supercomputer* benötigen die unter derzeit unzugänglichen Bedingungen arbeiten!

Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

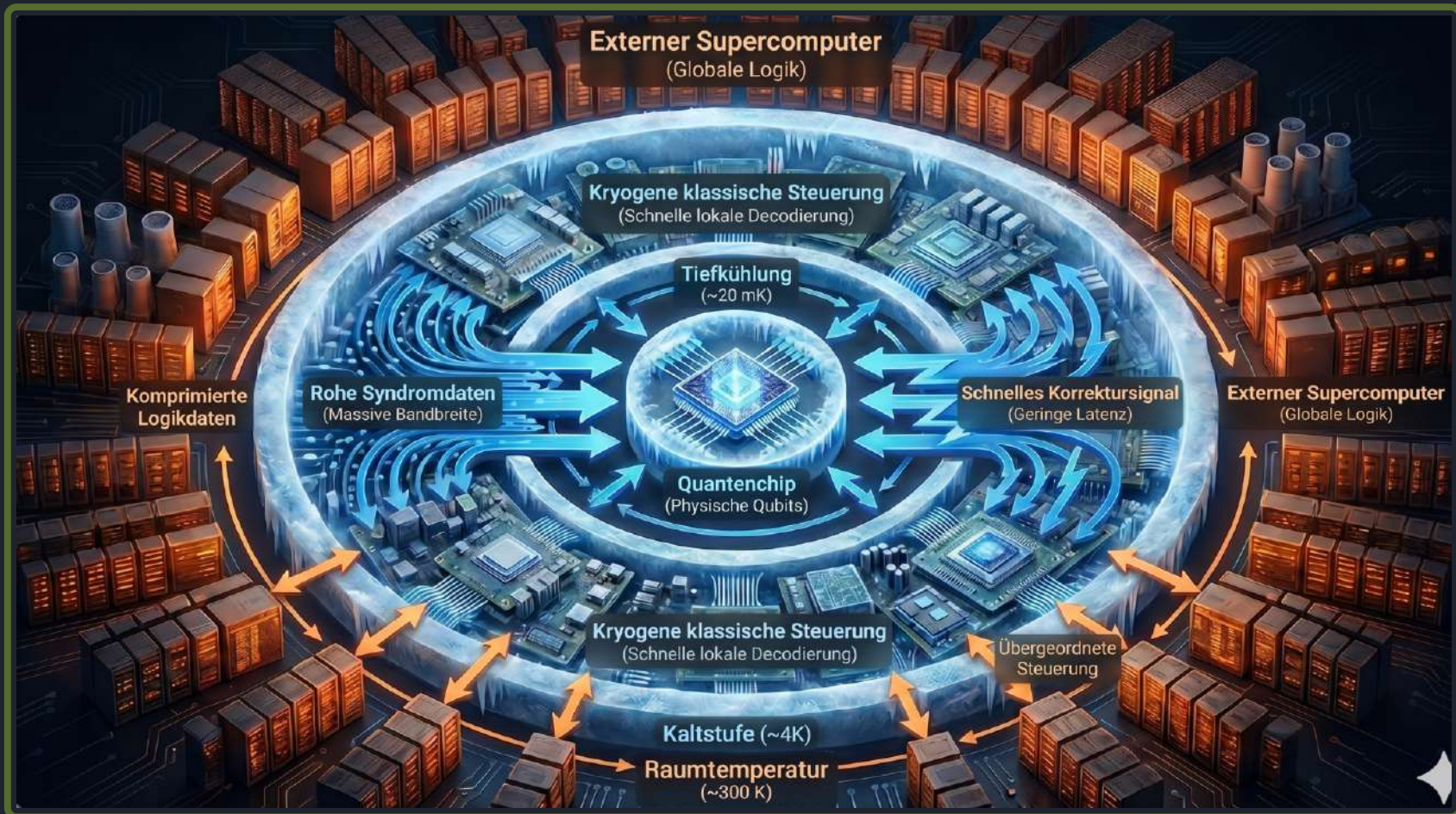
Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):



QEC alleine wird neuartige klassische *Supercomputer* benötigen die unter derzeit unzugänglichen Bedingungen arbeiten!

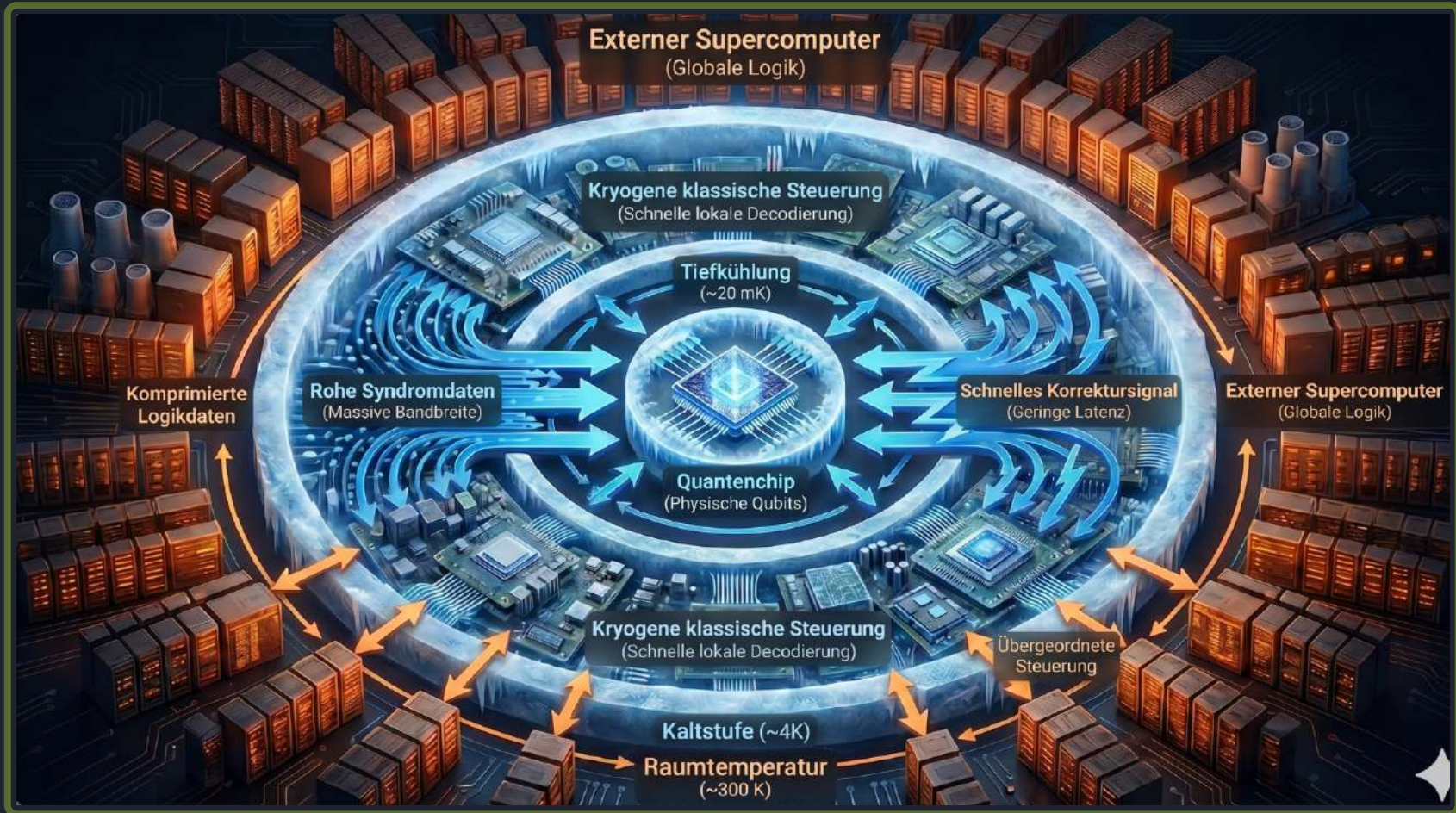
Die zur Zeit dominierende Strategie für zukünftige nutzungsrelevante Quantencomputer ist *NISQ+QEC*:

Unstabile Quantenspeicher, die in Millisekunden zerfallen, aufrechtzuerhalten durch *Quantenfehlerkorrektur* (QEC):



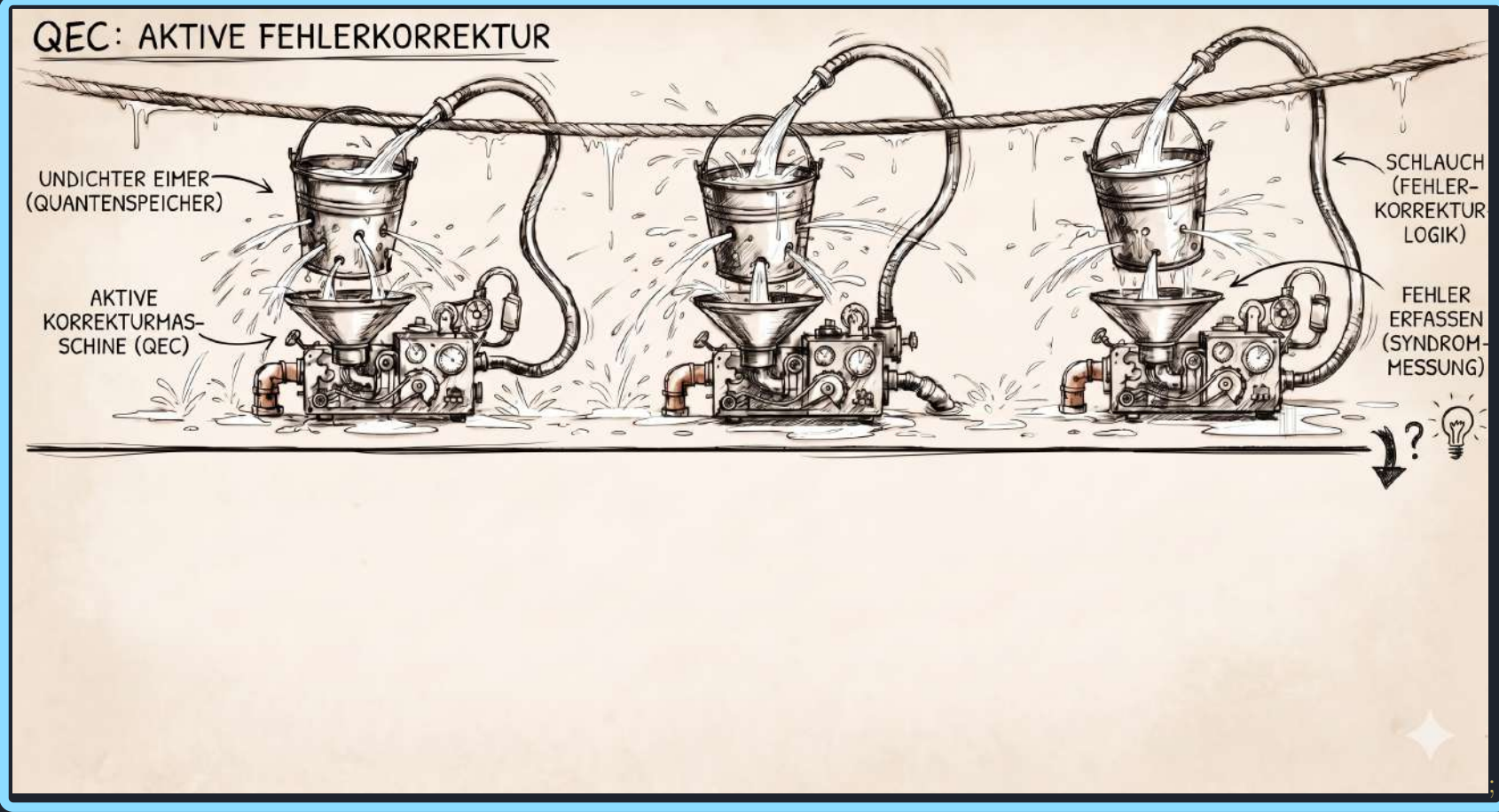
QEC alleine wird neuartige klassische *Supercomputer* benötigen die unter derzeit unzugänglichen Bedingungen arbeiten!

Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.



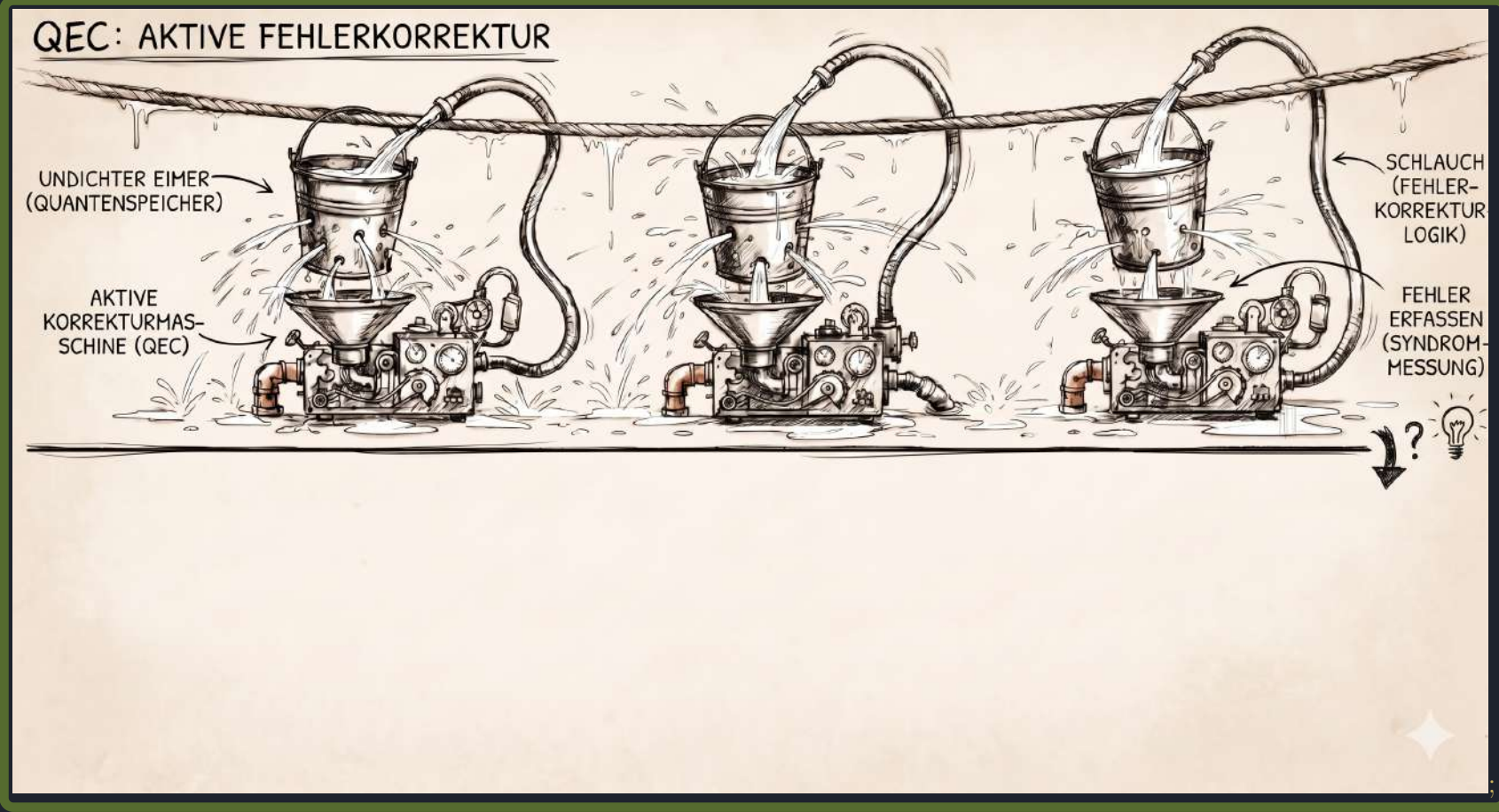
QEC alleine wird neuartige klassische *Supercomputer* benötigen die unter derzeit unzugänglichen Bedingungen arbeiten!

Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.

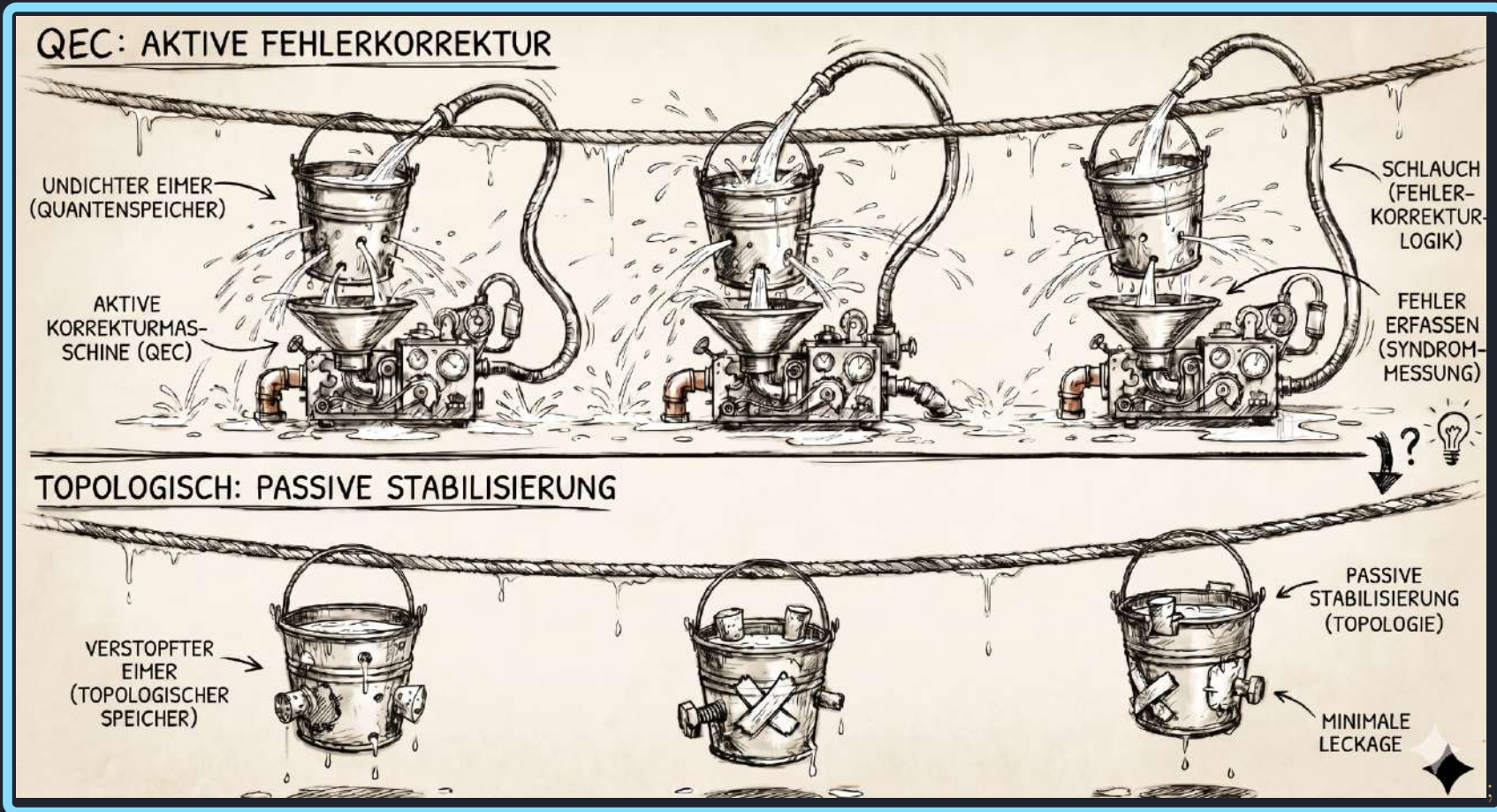


Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.

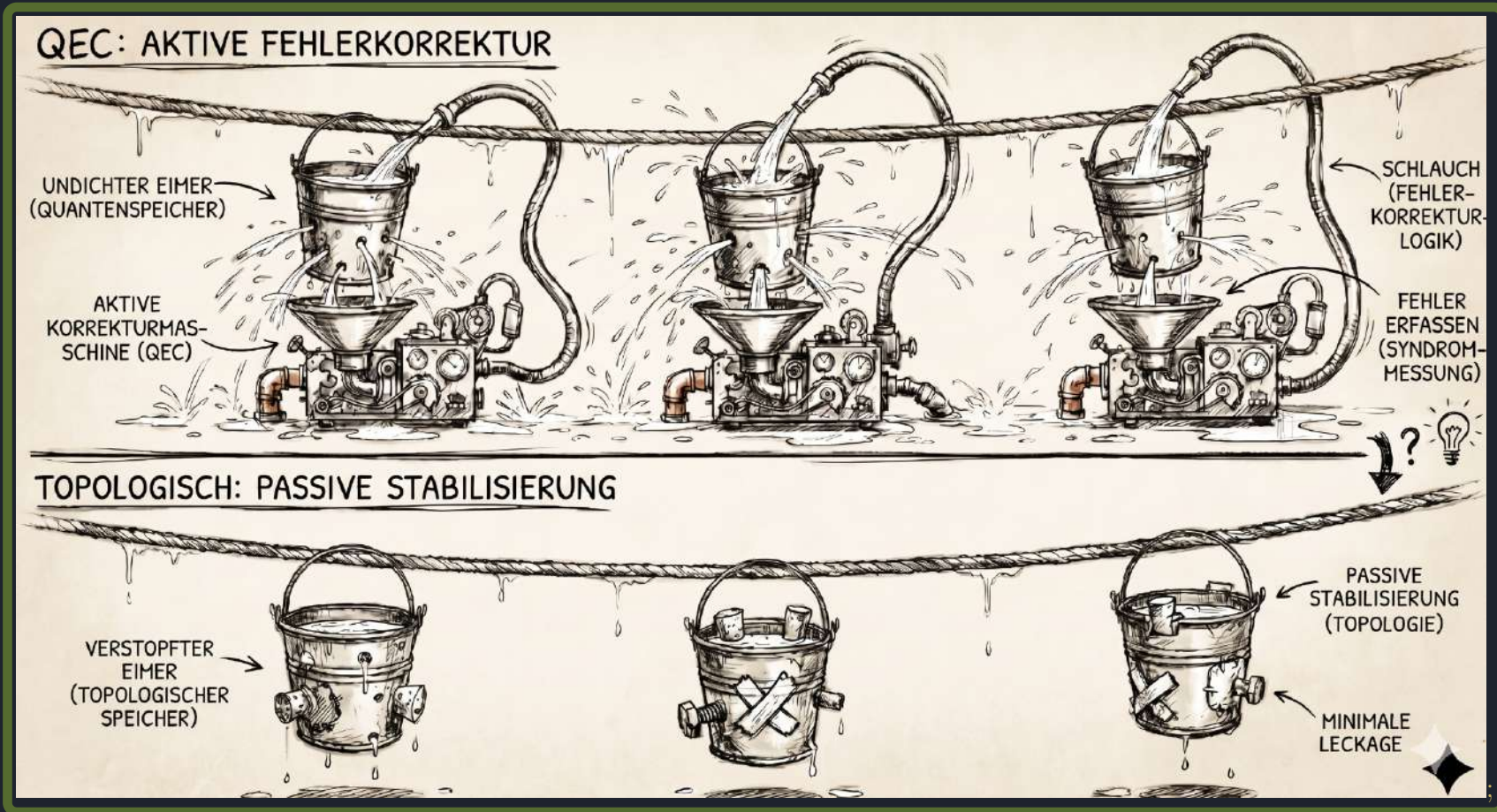
Die grundlegendere Lösung wäre: Die Eimer abdichten!



Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.
Die grundlegendere Lösung wäre: Die Eimer abdichten!

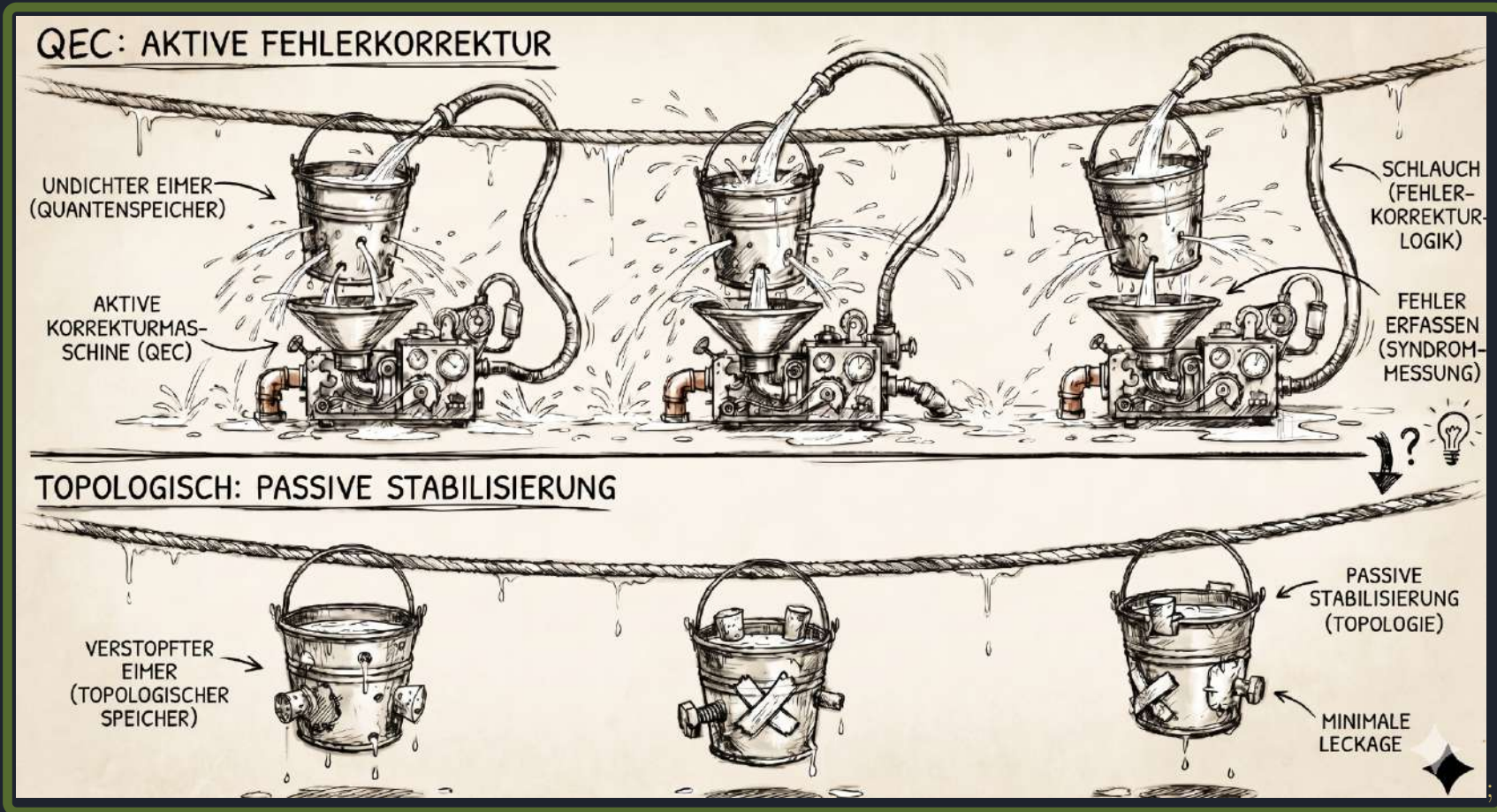


Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.
Die grundlegendere Lösung wäre: Die Eimer abdichten!



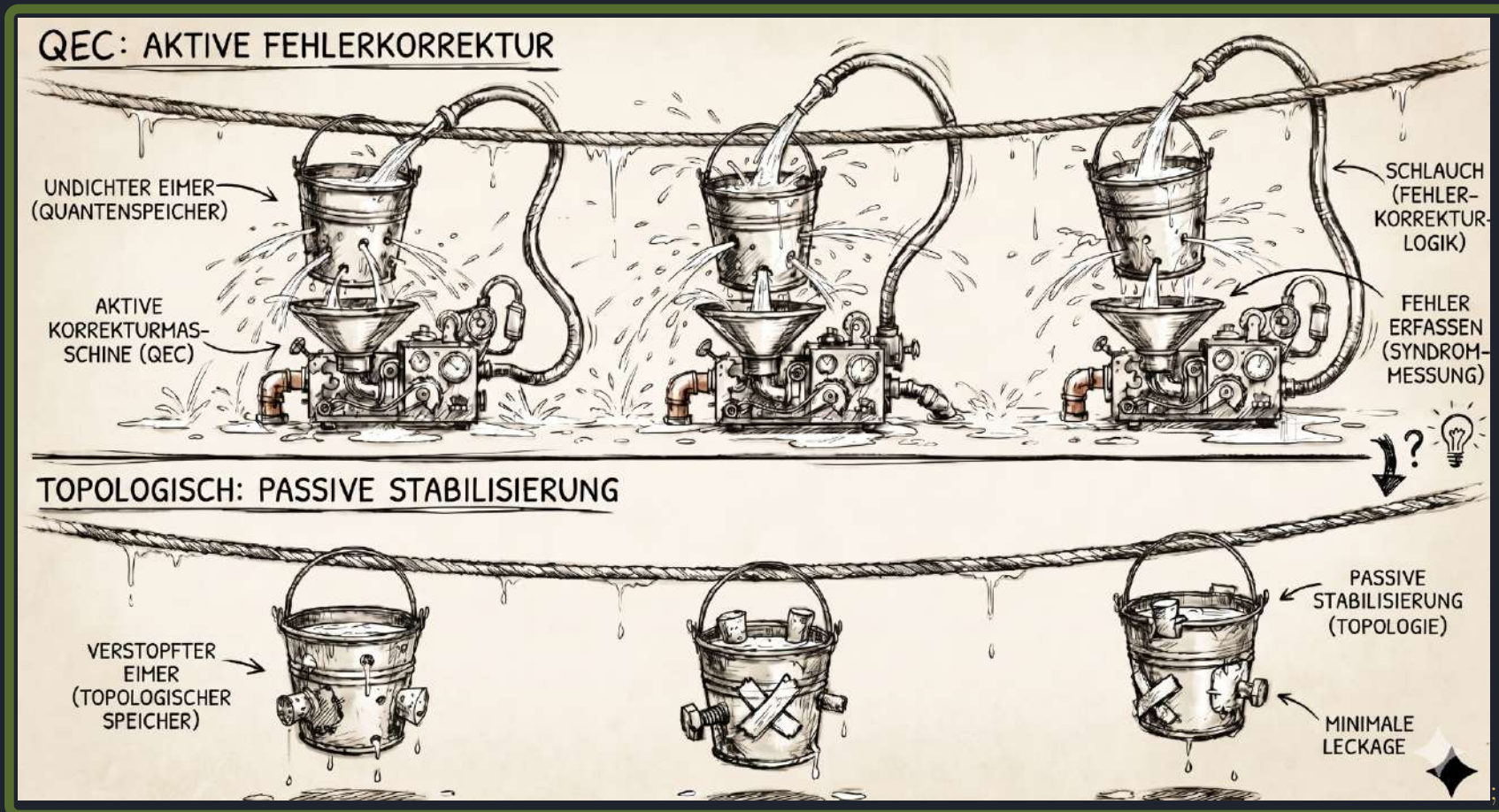
Diese fundamentale Lösung ist: *topologische Quanten*:
Intrinsisch stabilisierte Quantenzustände durch *Topologie*.

Kurz gesagt: QEC ist wie das hektische Nachfüllen von undichten Eimern.
Die grundlegendere Lösung wäre: Die Eimer abdichten!



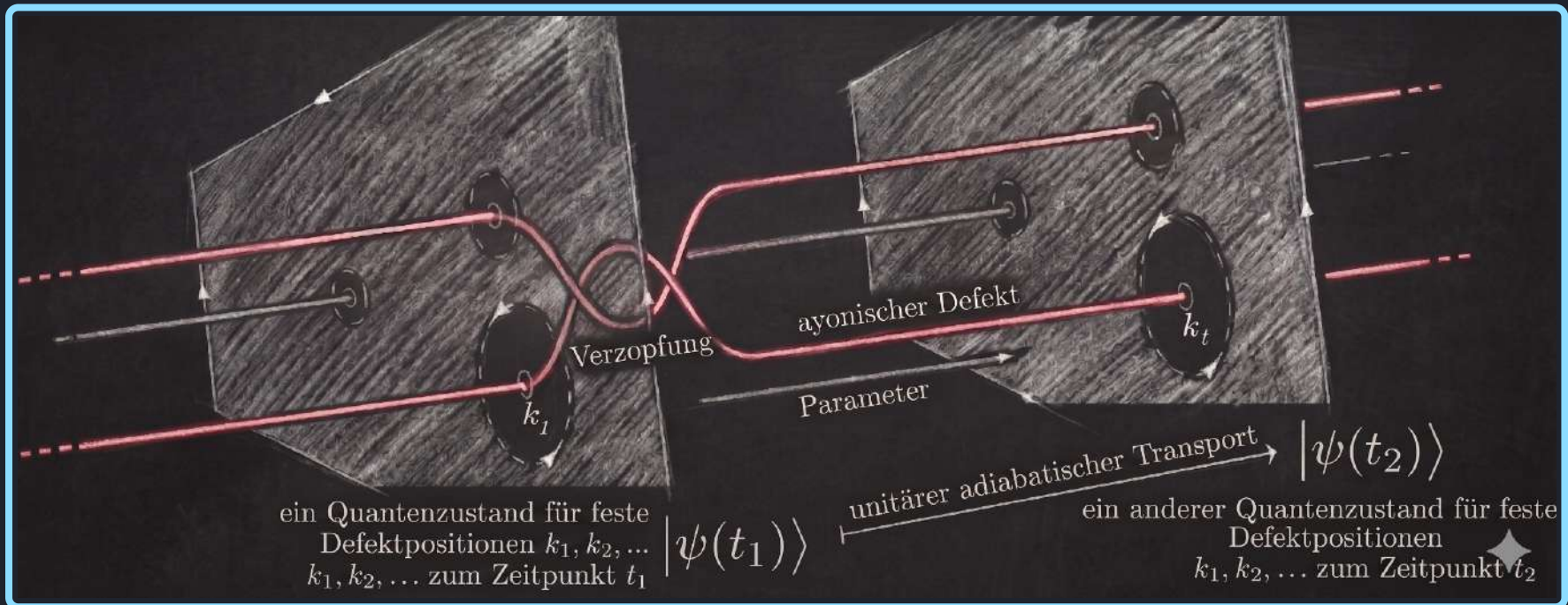
Diese fundamentale Lösung ist: *topologische Quanten*:
Intrinsisch stabilisierte Quantenzustände durch *Topologie*.

Ein Plattformkandidat für solche topologische Stabilisierung sind genau die zuvor erwähnten FQH Systeme.



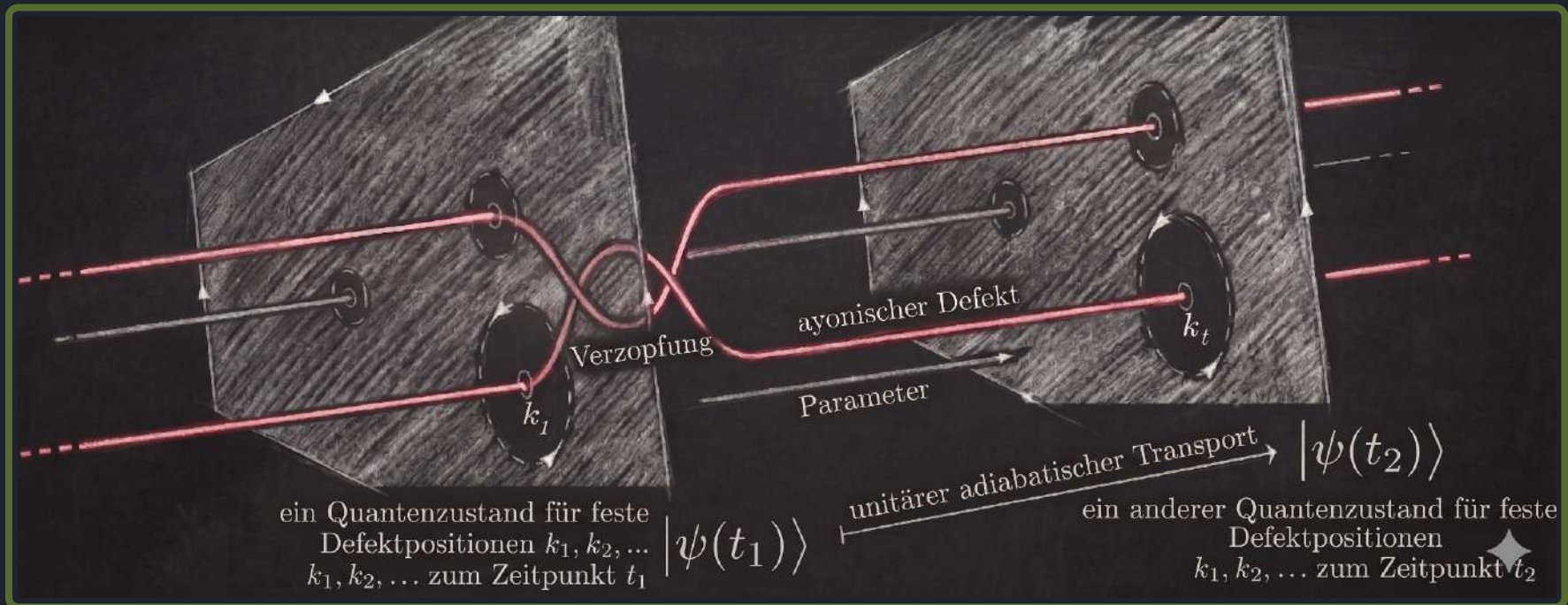
Ein Plattformkandidat für solche topologische Stabilisierung sind genau die zuvor erwähnten FQH Systeme.

da die Verzopfungsphase von lokalen Störungen unabhängig ist.



Ein Plattformkandidat für solche topologische Stabilisierung sind genau die zuvor erwähnten FQH Systeme.

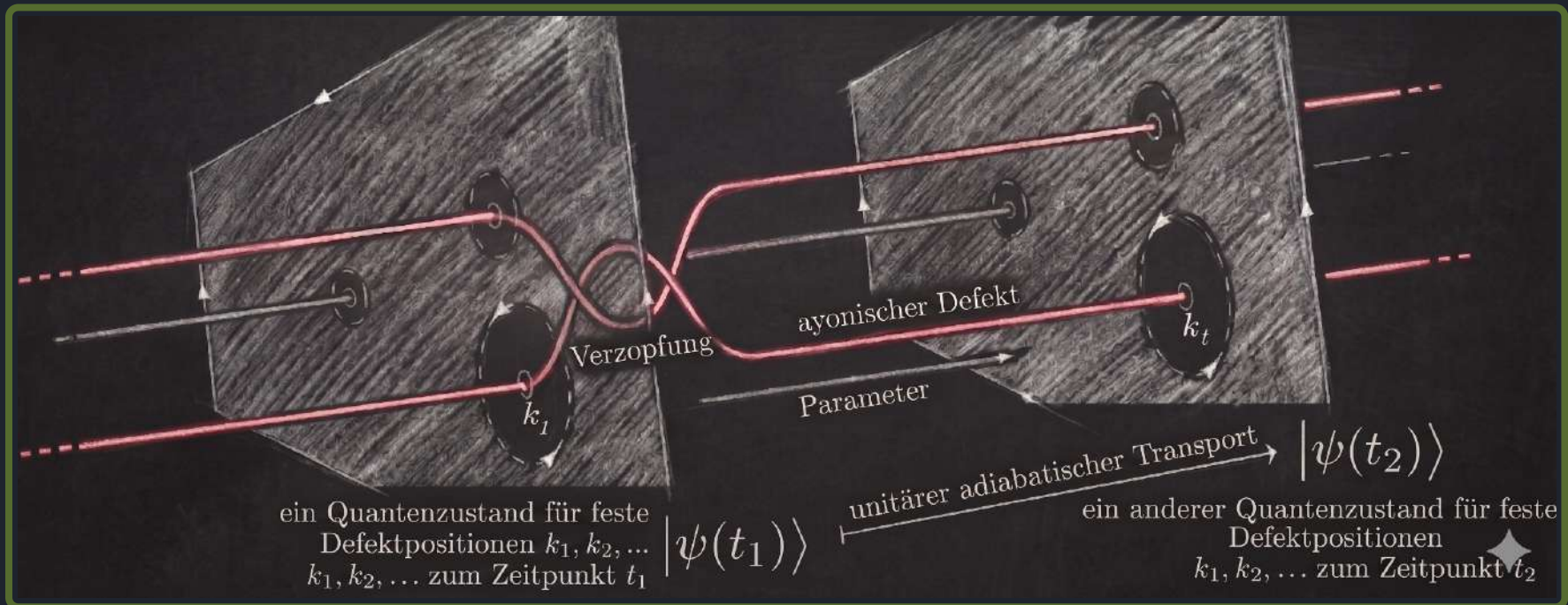
da die Verzopfungsphase von lokalen Störungen unabhängig ist.



Diese (abelschen) Phasen wurden experimentell beobachtet(!)

Ein Plattformkandidat für solche topologische Stabilisierung sind genau die zuvor erwähnten FQH Systeme.

da die Verzopfungsphase von lokalen Störungen unabhängig ist.

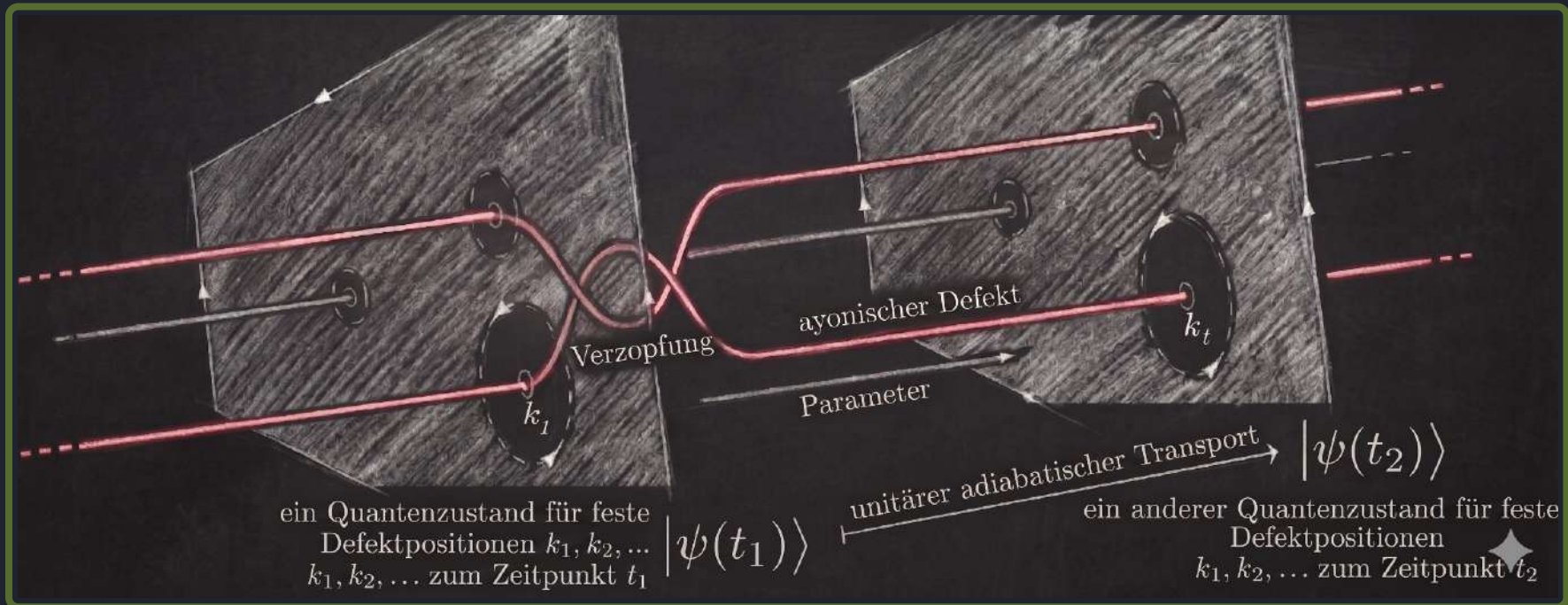


Diese (abelschen) Phasen wurden experimentell beobachtet(!)

aber viele Fragen bleiben offen, insbesondere betreffend nichtabelscher und kontrollierter Verzopfung.

Ein Plattformkandidat für solche topologische Stabilisierung sind genau die zuvor erwähnten FQH Systeme.

da die Verzopfungsphase von lokalen Störungen unabhängig ist.



Diese (abelschen) Phasen wurden experimentell beobachtet(!)

aber viele Fragen bleiben offen, insbesondere betreffend nichtabelscher und kontrollierter Verzopfung.

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow



F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

Solitonen,

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,*

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,
Skyrmionen,*

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,
Skyrmionen,
Instantonen,*

F: Also, wie versteht man eigentlich
nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,
Skyrmionen,
Instantonen,
...*

F: Also, wie versteht man eigentlich nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

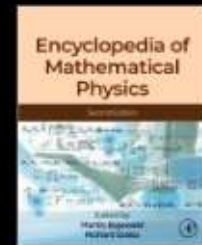
A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,
Skyrmionen,
Instantonen,
...*



Encyclopedia of Mathematical Physics (Second Edition)

Volume 4, 2025, Pages 281-324



Flux Quantization

Hisham Sati, Urs Schreiber

F: Also, wie versteht man eigentlich nicht-störungstheoretische physikalische Felder?

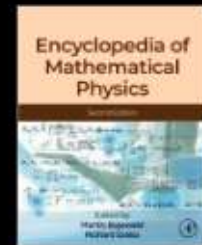
A: *Flussquantisierung* \Rightarrow

*Solitonen,
Monopole,
Skyrmionen,
Instantonen,
...*



Encyclopedia of Mathematical Physics (Second Edition)

Volume 4, 2025, Pages 281-324

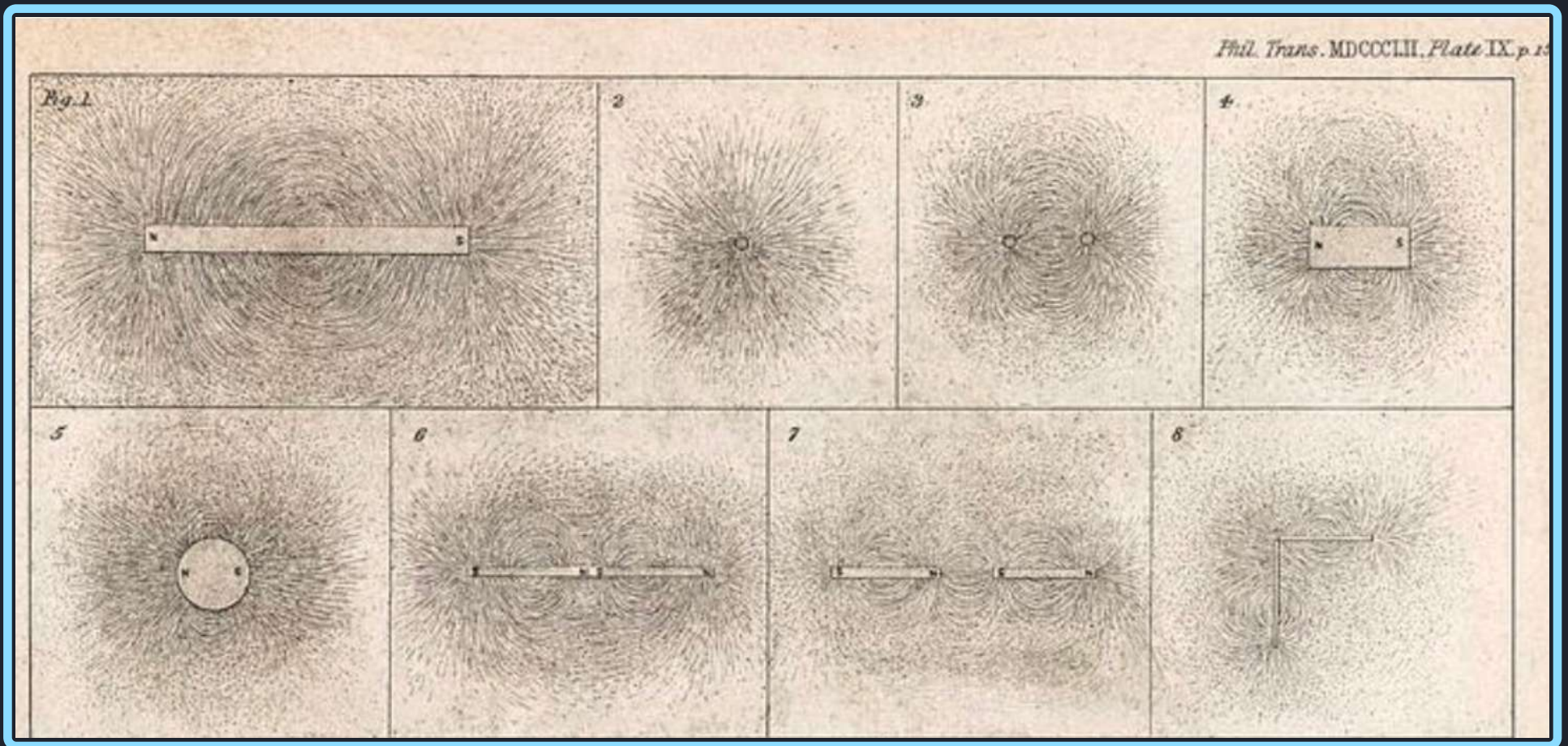


Flux Quantization

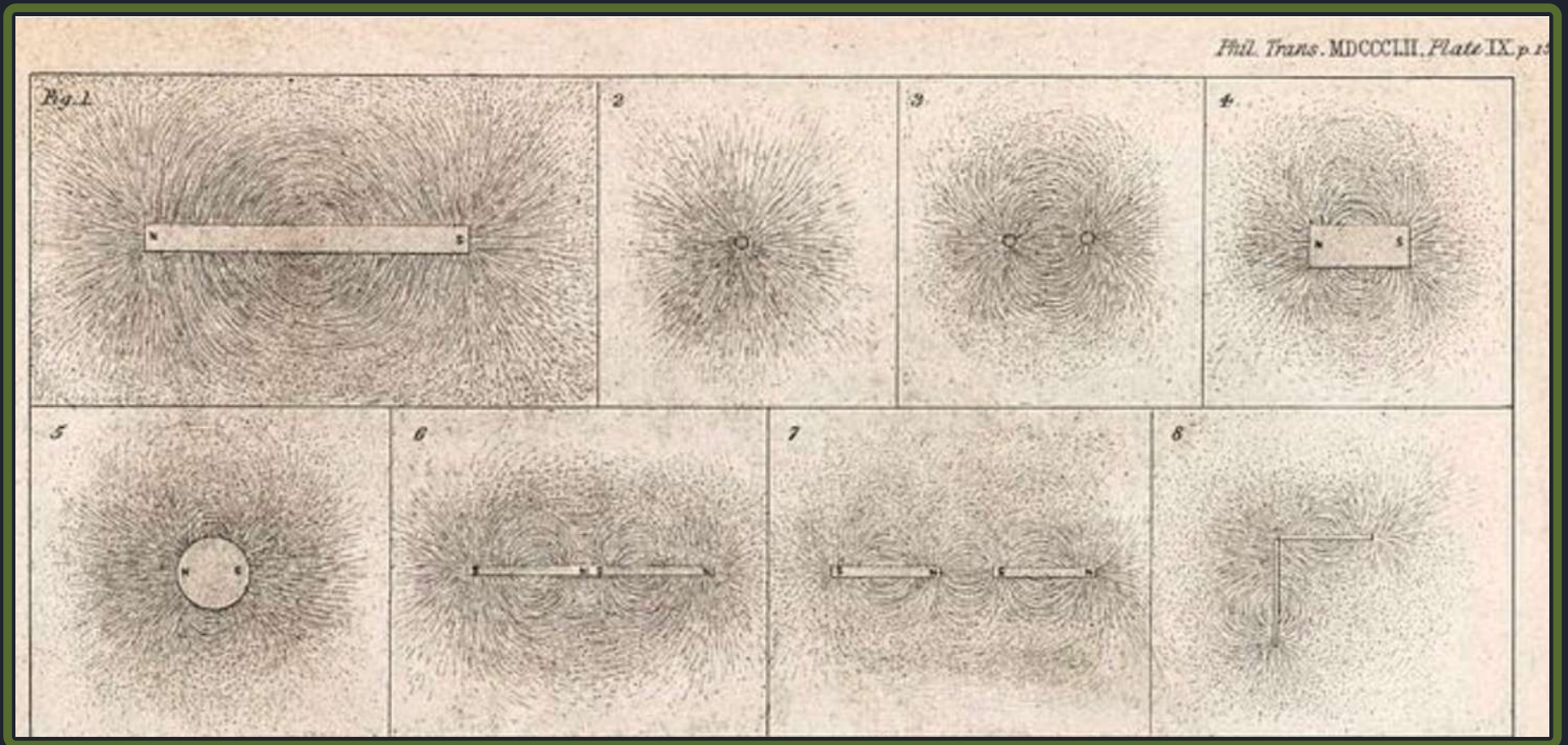
Hisham Sati, Urs Schreiber

Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten

Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten

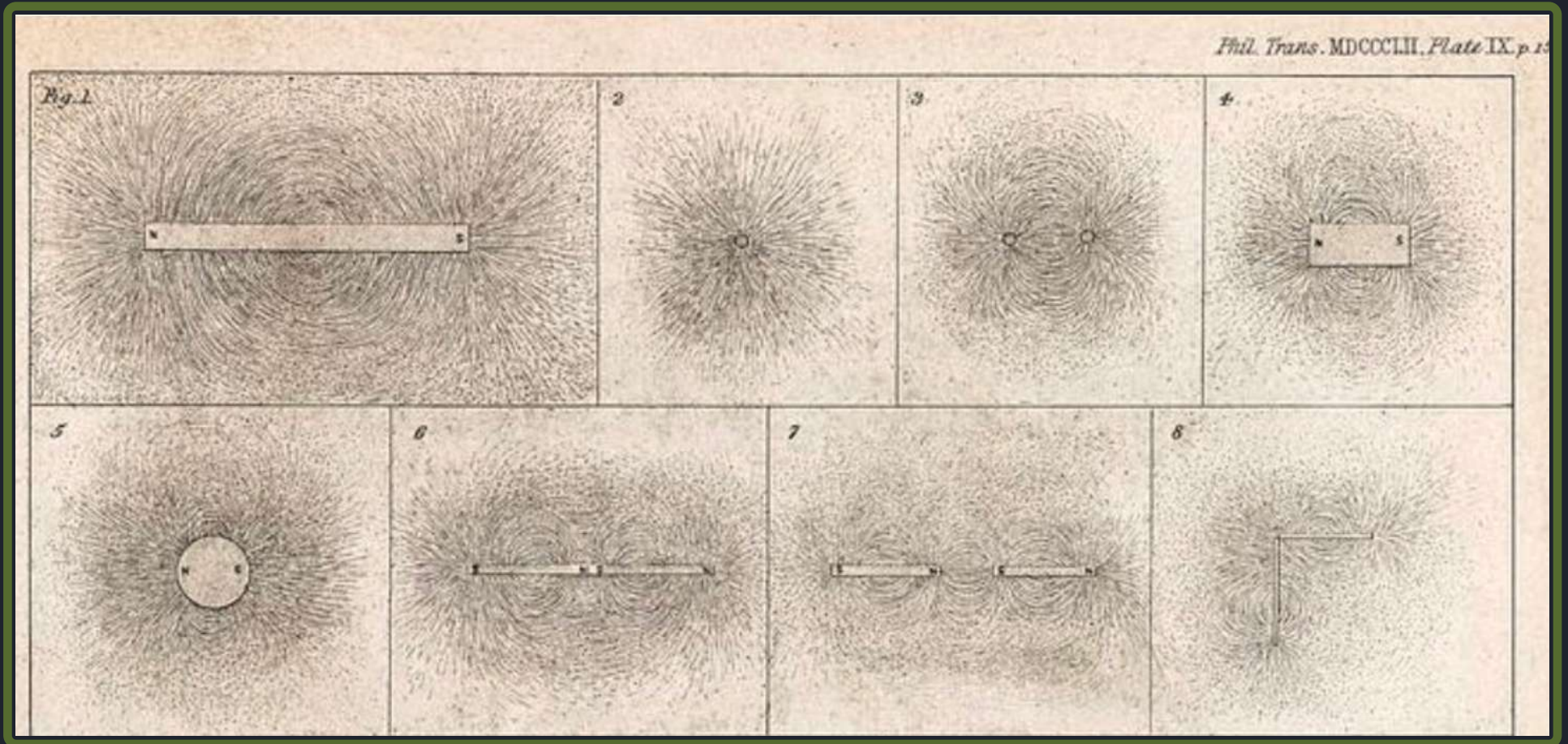


Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten



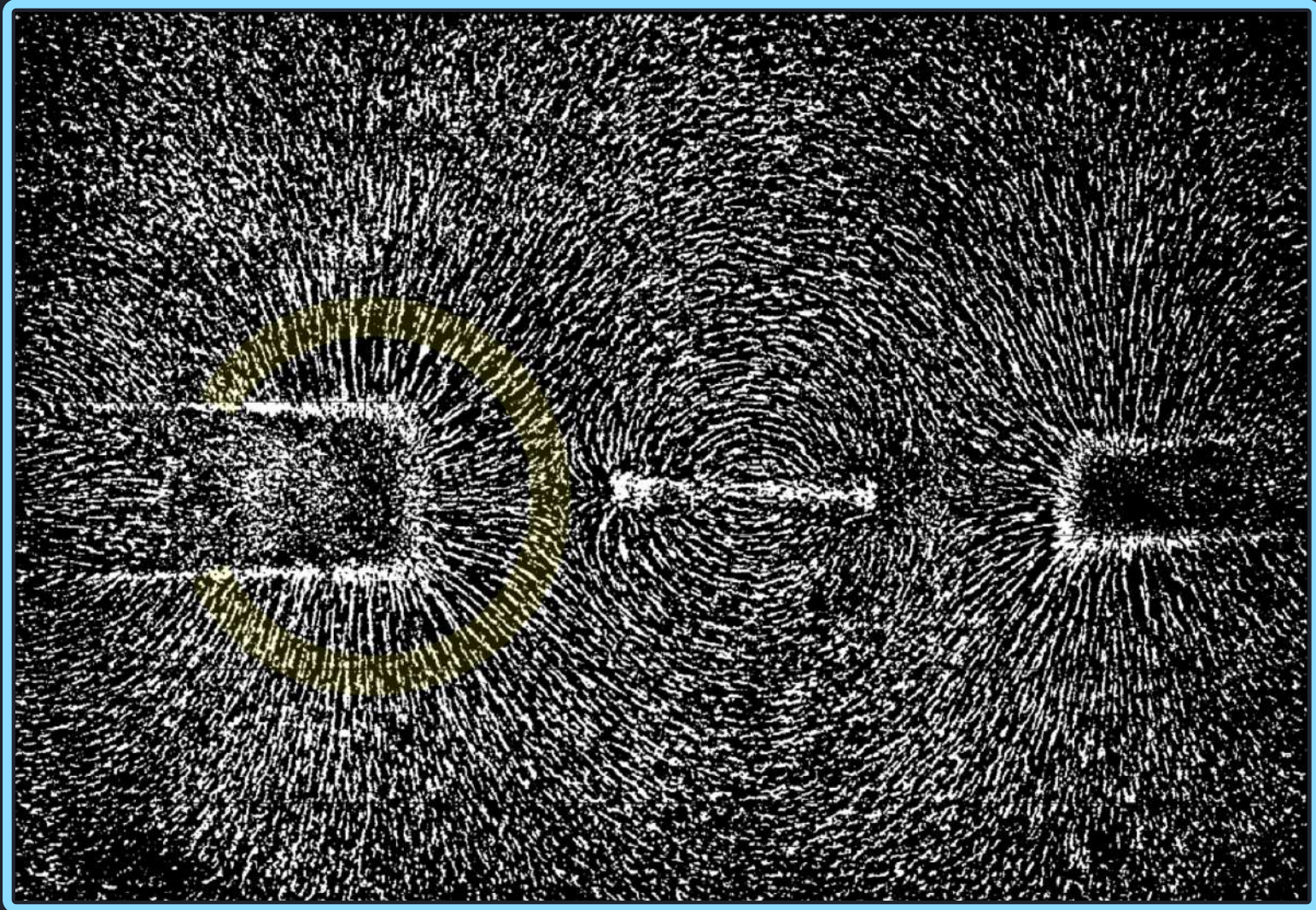
Dies enthüllte *magnetische Feldlinien*
die den magnetischen Polen entspringen.

Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten



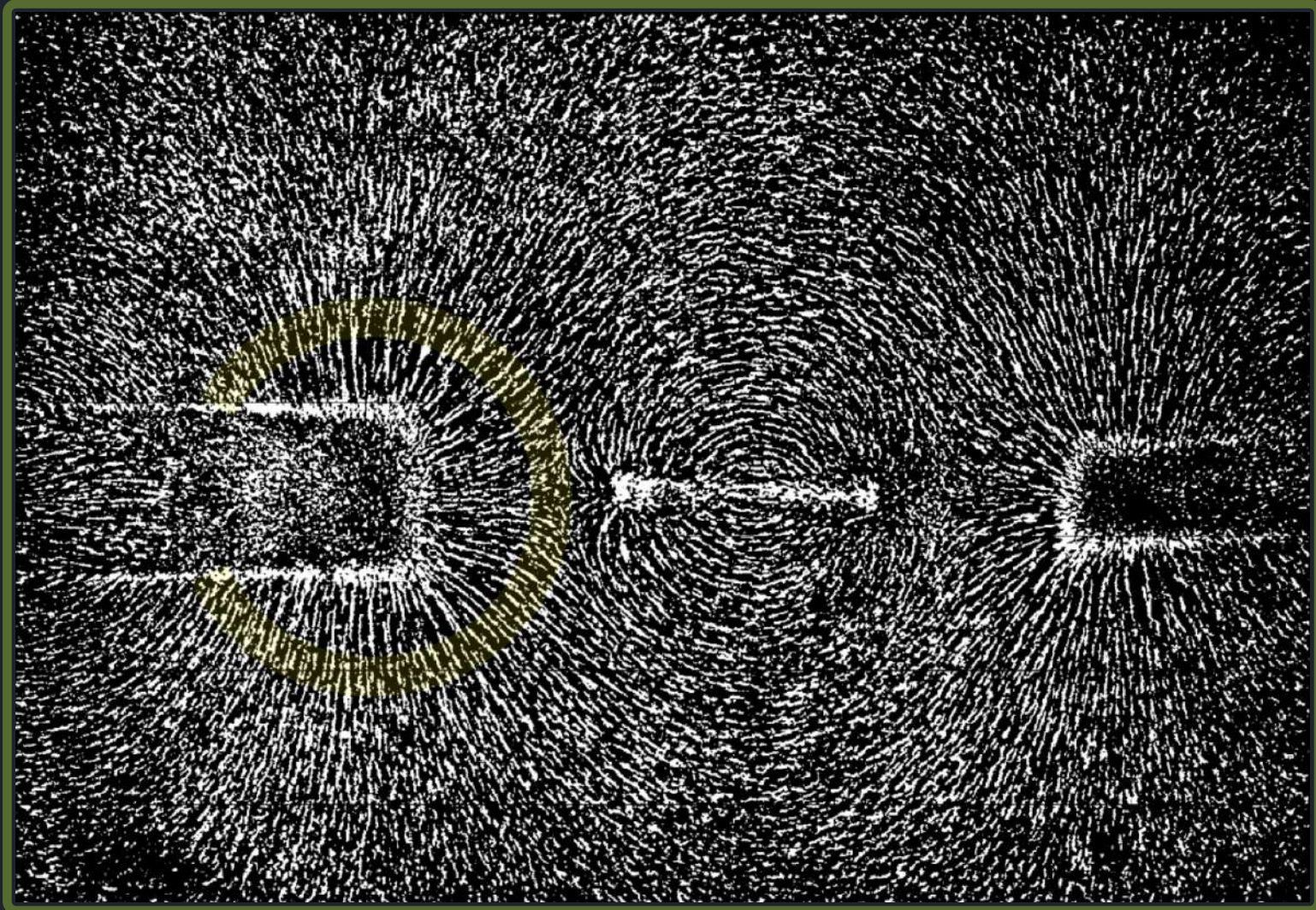
Dies enthüllte *magnetische Feldlinien*
die den magnetischen Polen entspringen.

Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten



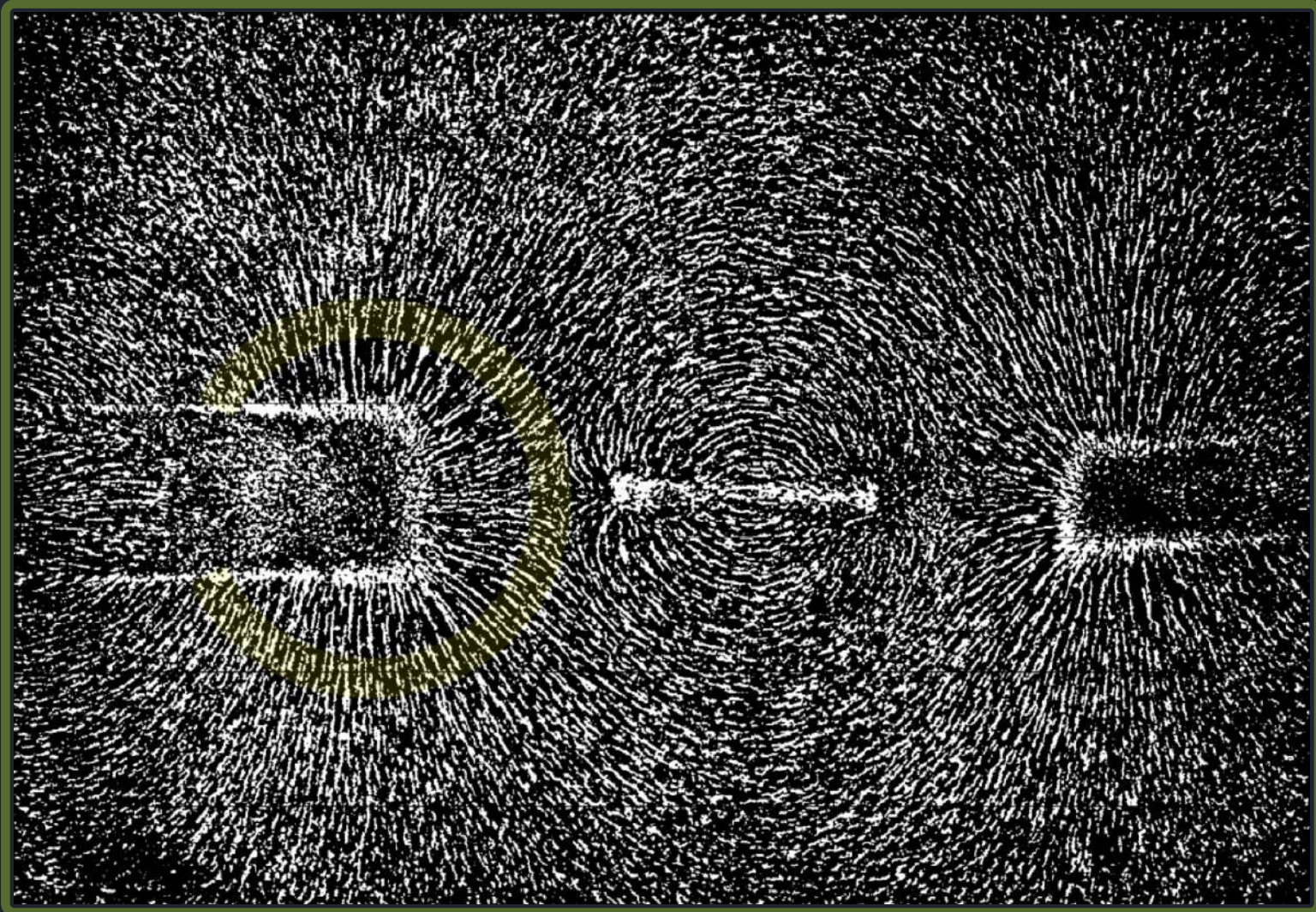
Dies enthüllte *magnetische Feldlinien*
die den magnetischen Polen entspringen.

Im Jahr 1852 streute Michael Faraday
Eisenspäne über die Pole eines Magneten

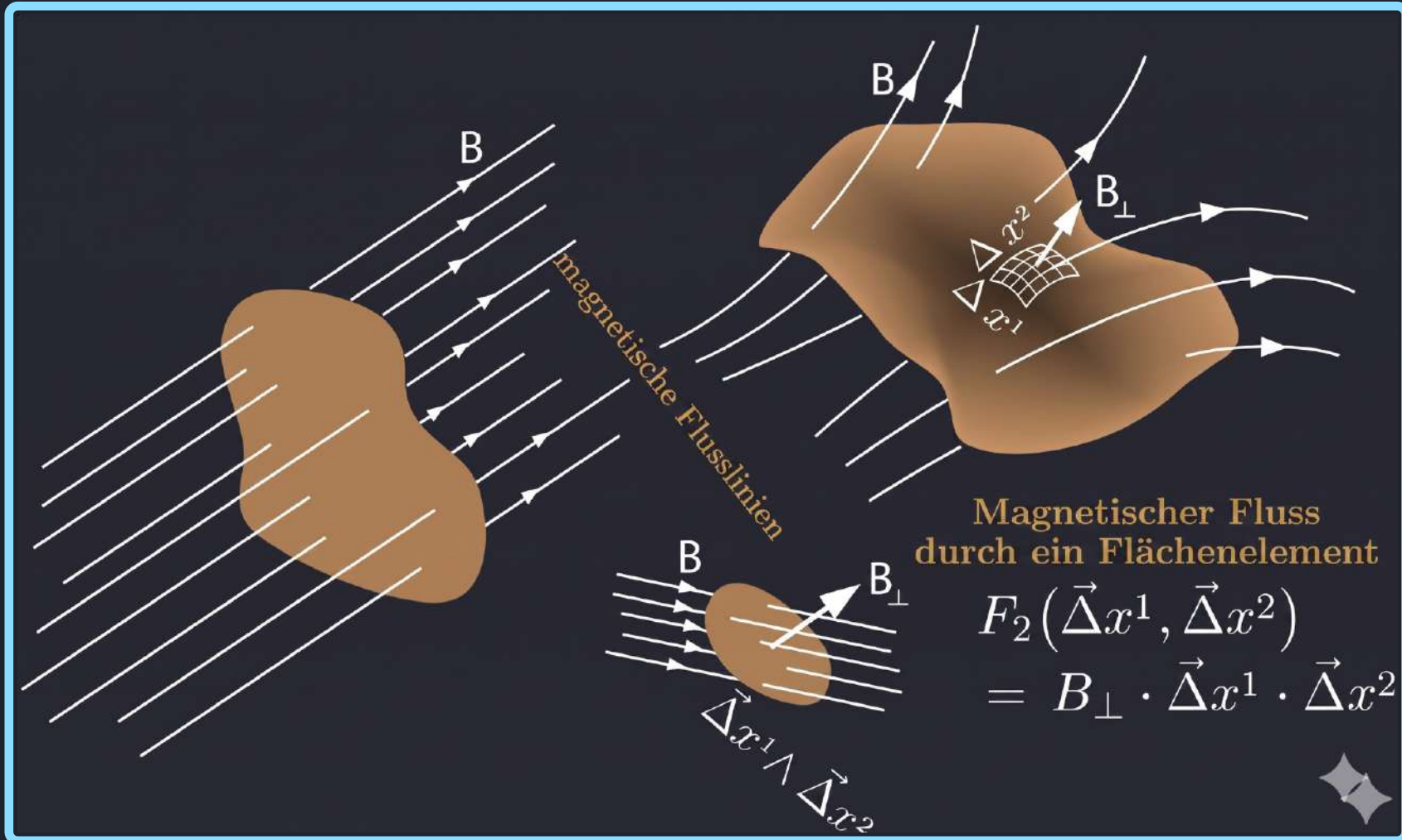


Dies enthüllte *magnetische Feldlinien*
die den magnetischen Polen entspringen.

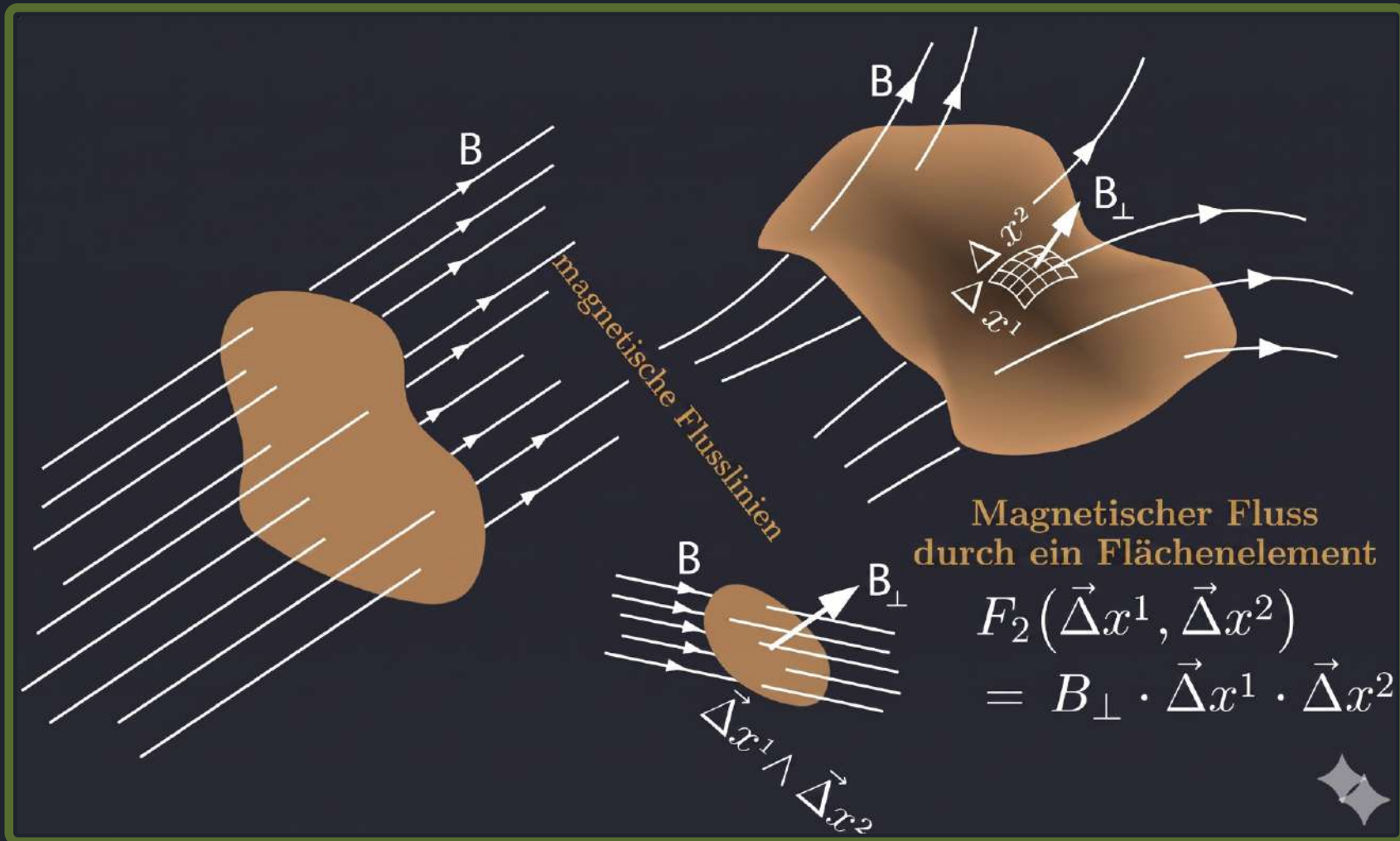
Das magnetische Feld B wird bestimmt dadurch wieviel Fluss F durch gegebene Flächenelemente $\Delta x^1 \times \Delta x^2$ tritt



Das magnetische Feld B wird bestimmt dadurch wieviel Fluss F durch gegebene Flächenelemente $\Delta x^1 \times \Delta x^2$ tritt

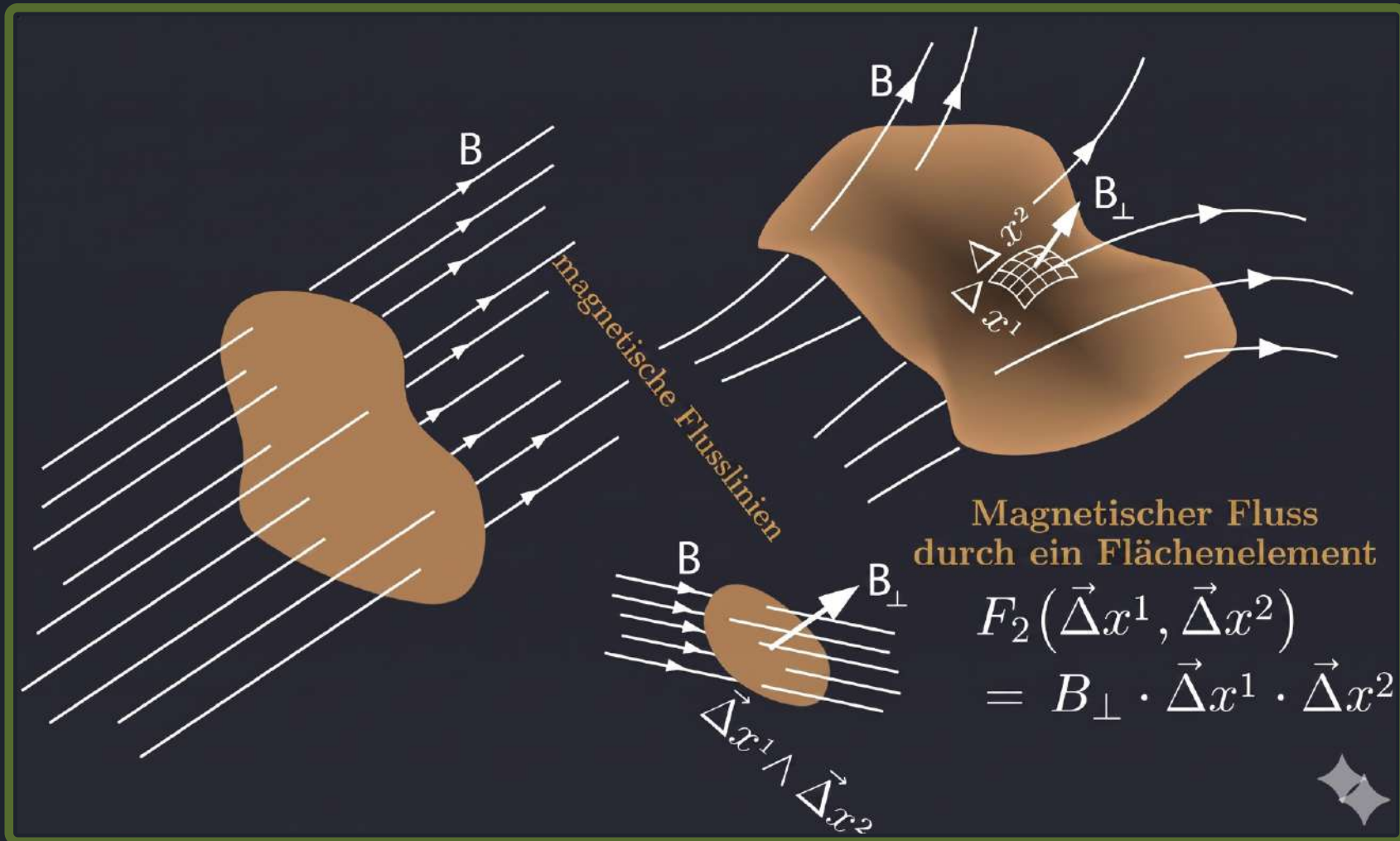


Das magnetische Feld B wird bestimmt dadurch wieviel Fluss F durch gegebene Flächenelemente $\Delta x^1 \times \Delta x^2$ tritt



Diese Zuordnung F_2 wird nun eine *Differentialform* genannt.

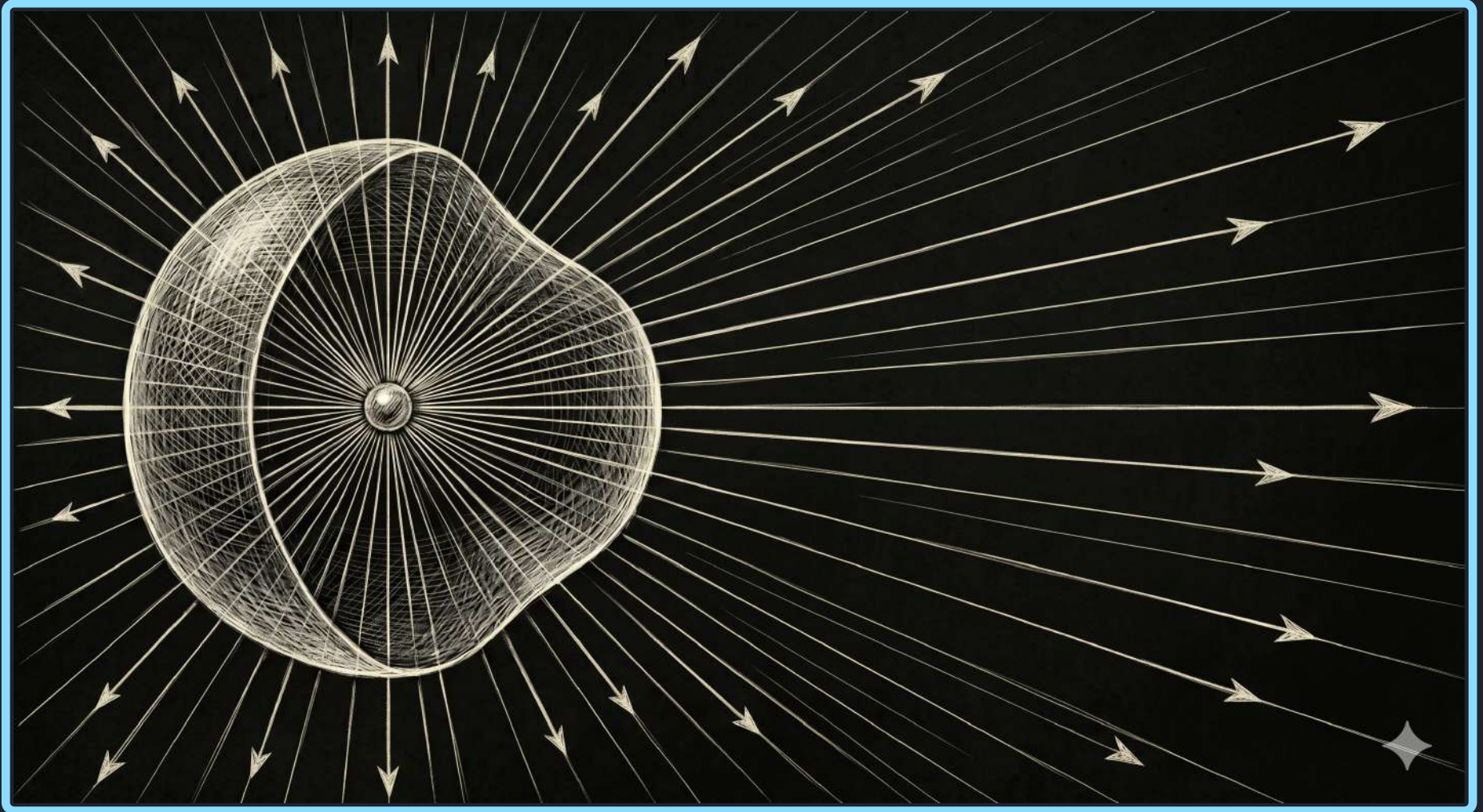
Das magnetische Feld B wird bestimmt dadurch wieviel Fluss F durch gegebene Flächenelemente $\Delta x^1 \times \Delta x^2$ tritt



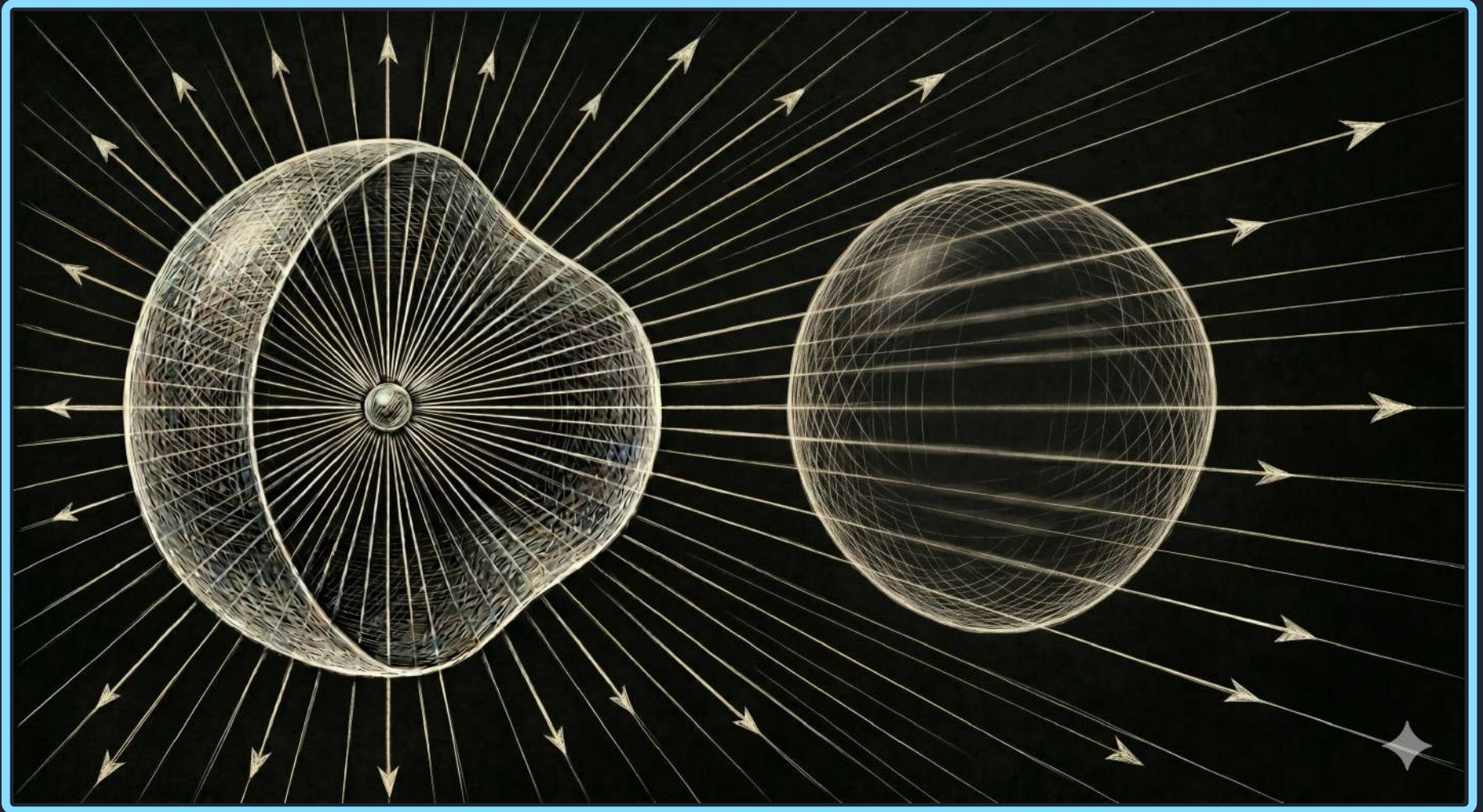
Diese Zuordnung F_2 wird nun eine *Differentialform* genannt.

Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol

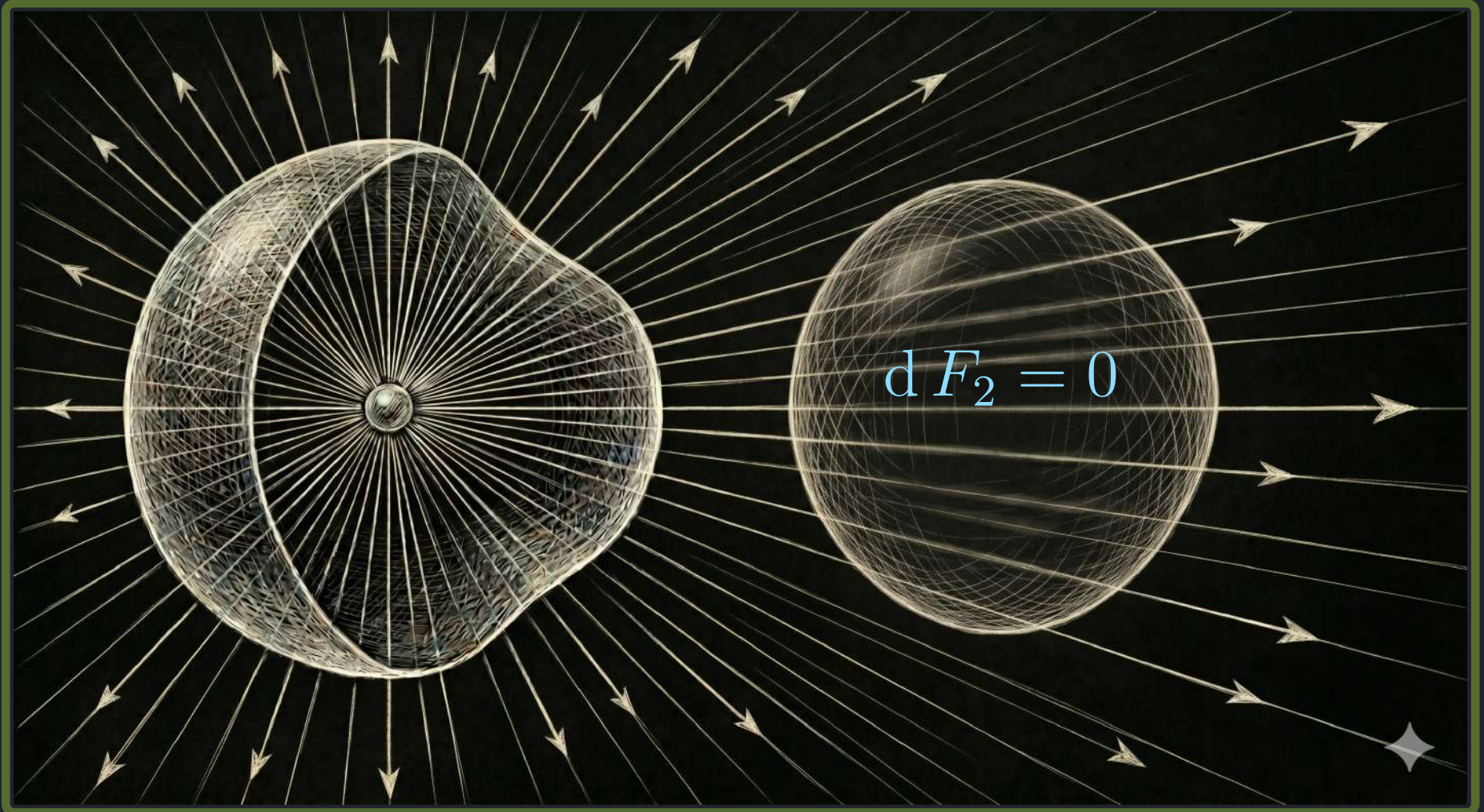
Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol



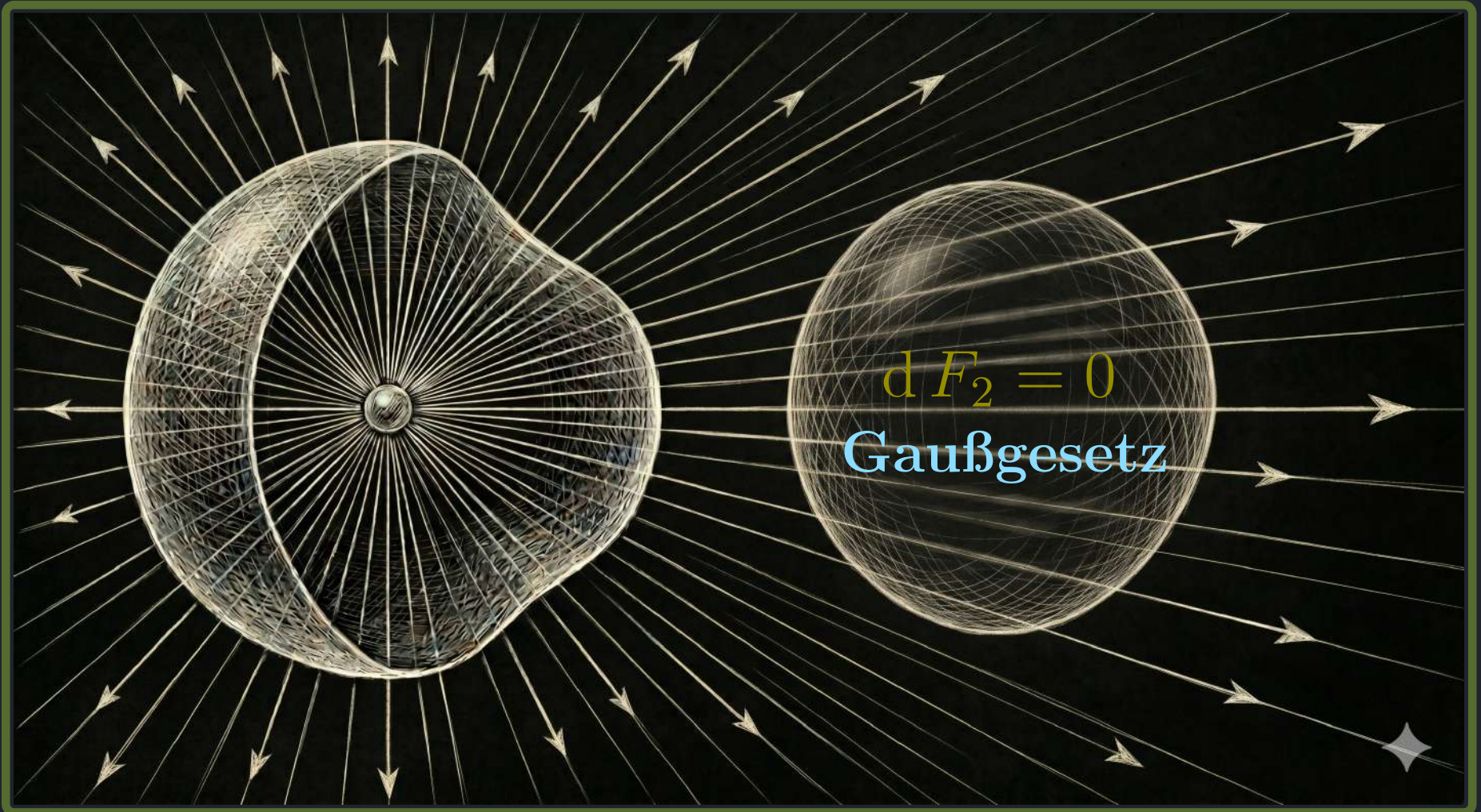
Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: “ $dF_2 = 0$ ”.



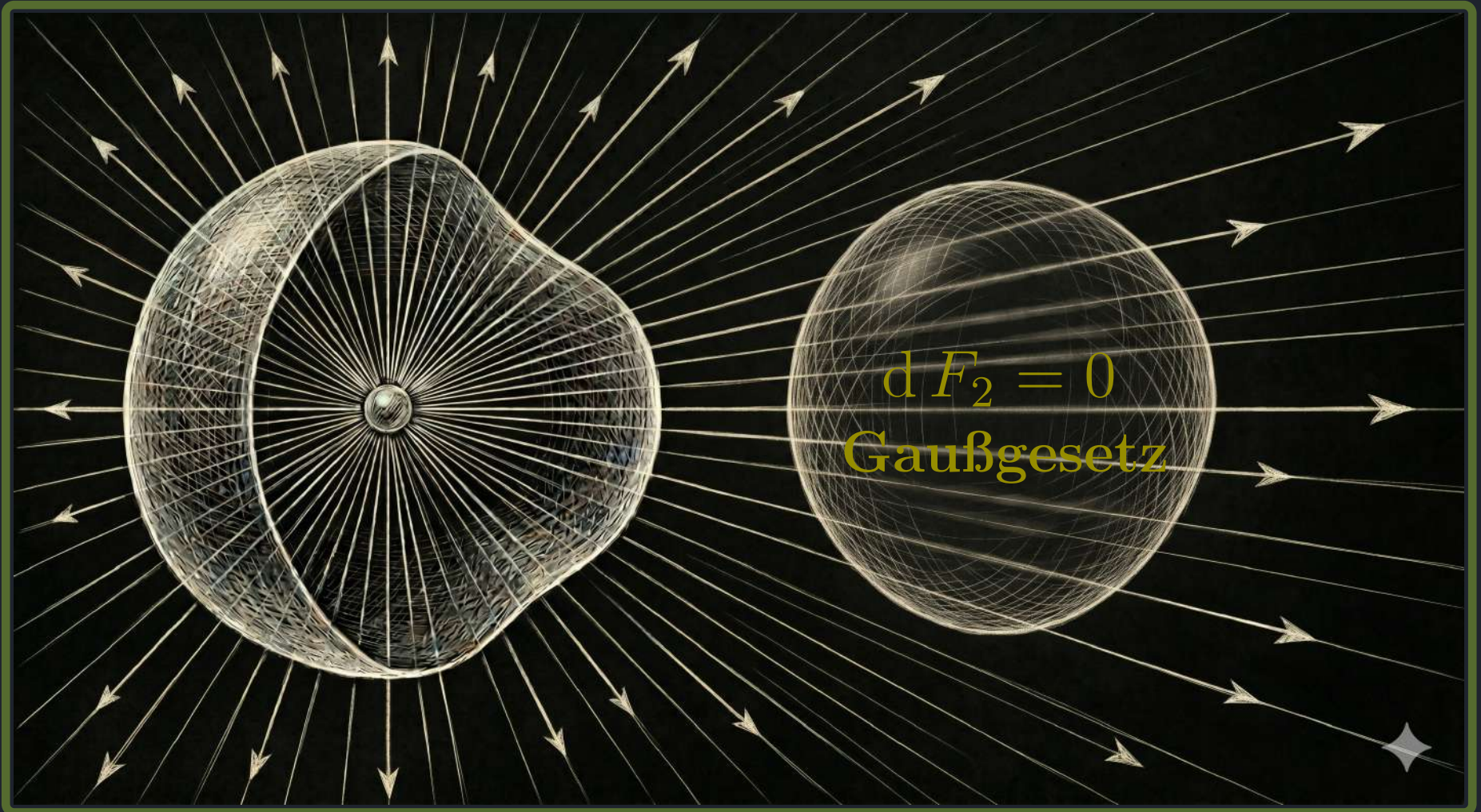
Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: " $dF_2 = 0$ ".



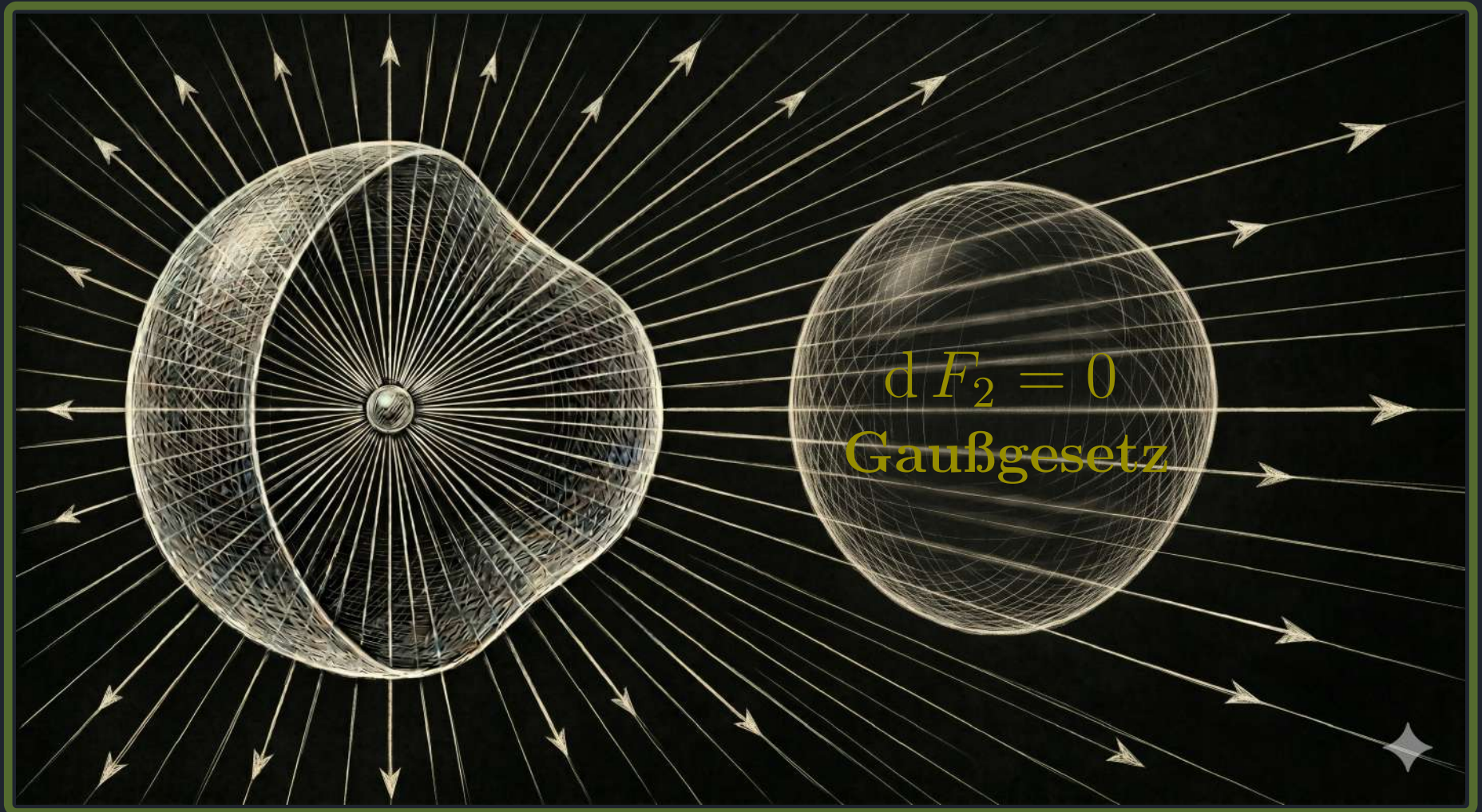
Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: " $dF_2 = 0$ ".



Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: " $dF_2 = 0$ ".

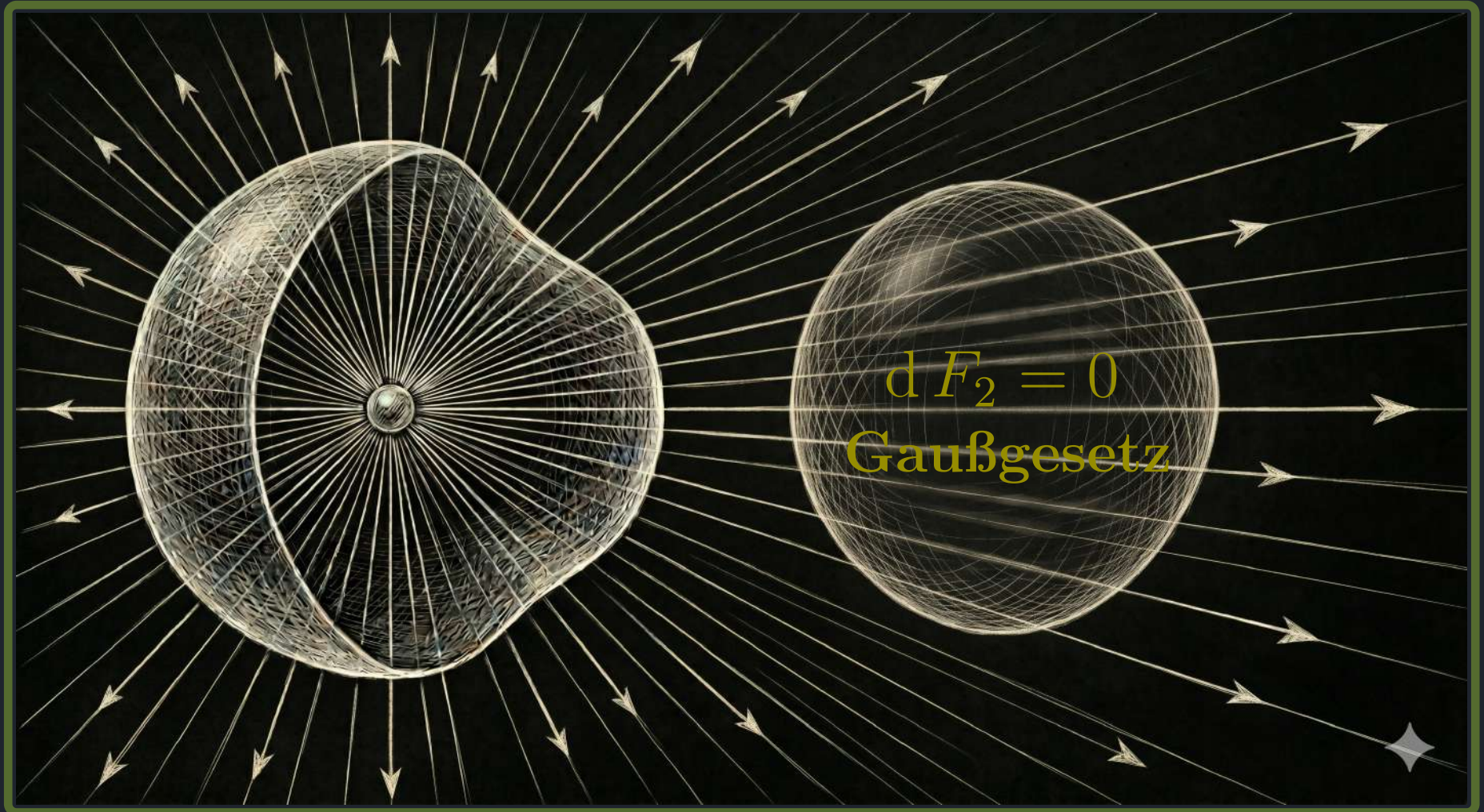


Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: " $dF_2 = 0$ ".



Ansonsten darf, gemäß Faraday, der Gesamtfluss durch eine Sphäre jeden reellen Wert annehmen.

Die magnetische Flussdichte *divergiert* am (Mono-)Pol
und ist anderswo *divergenzfrei*: “ $dF_2 = 0$ ”.



Ansonsten darf, gemäß Faraday, der Gesamtfluss durch eine Sphäre jeden reellen Wert annehmen.

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field

By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.

(Received May 29, 1931.)

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

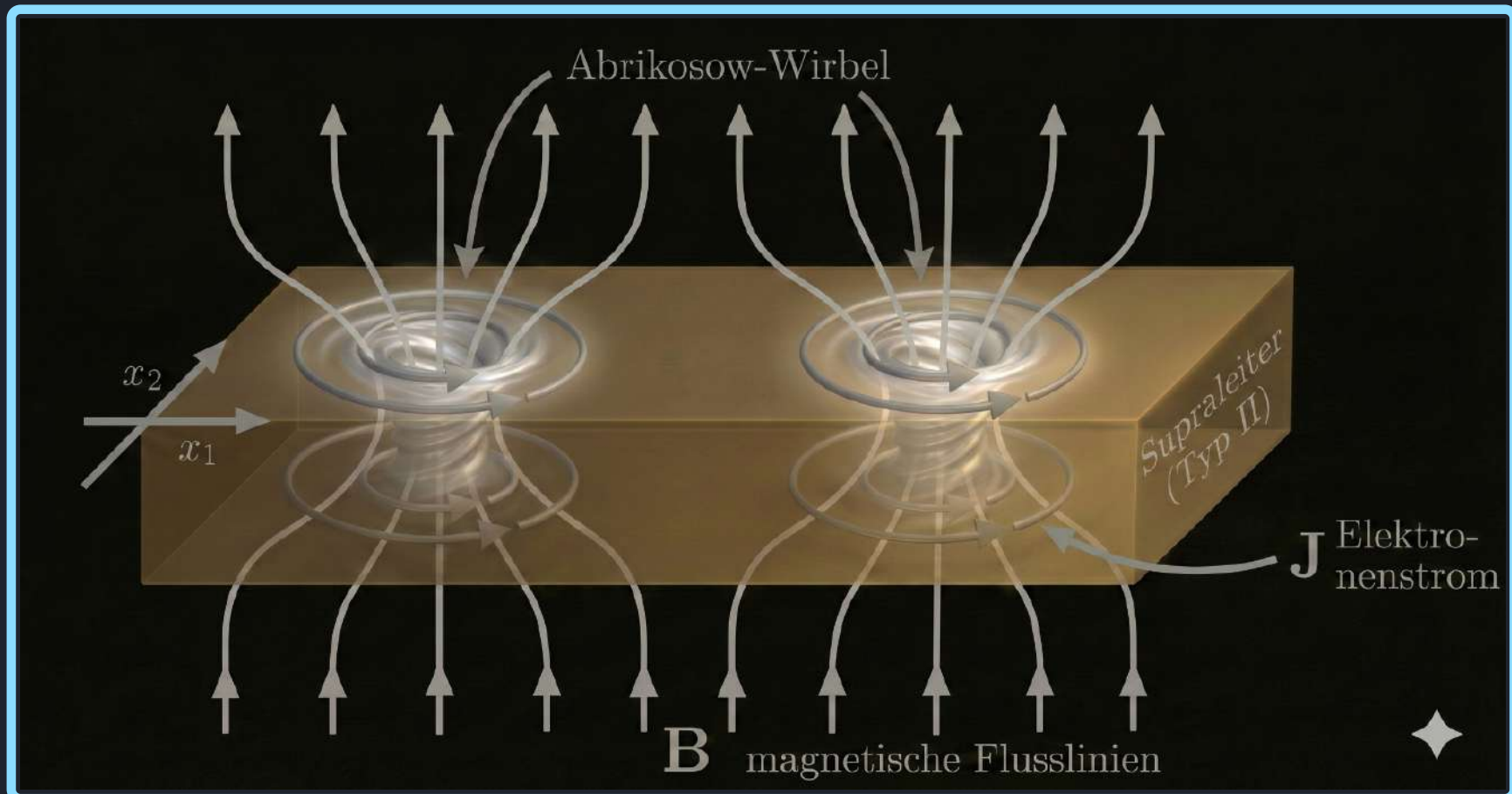
Seit 1967 werden diese Flussquanten experimentell beobachtet:

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Seit 1967 werden diese Flussquanten experimentell beobachtet:

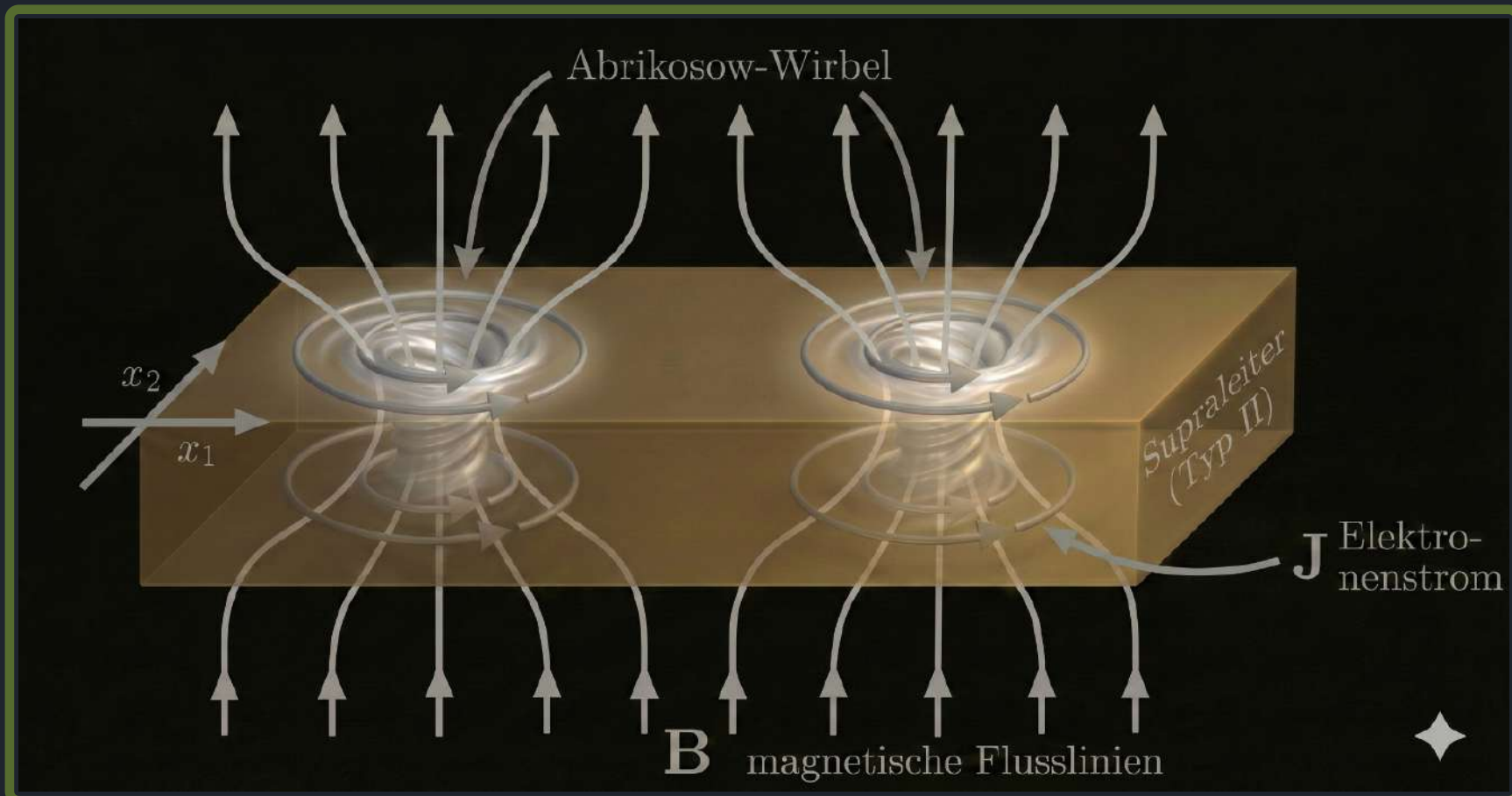


Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Seit 1967 werden diese Flussquanten experimentell beobachtet:



Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Aber dies ist eine subtile nicht-perturbative Bedingung:

Lokal ist die Flussdichte beliebig, aber
global integriert sie zu einer ganzen Zahl!

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

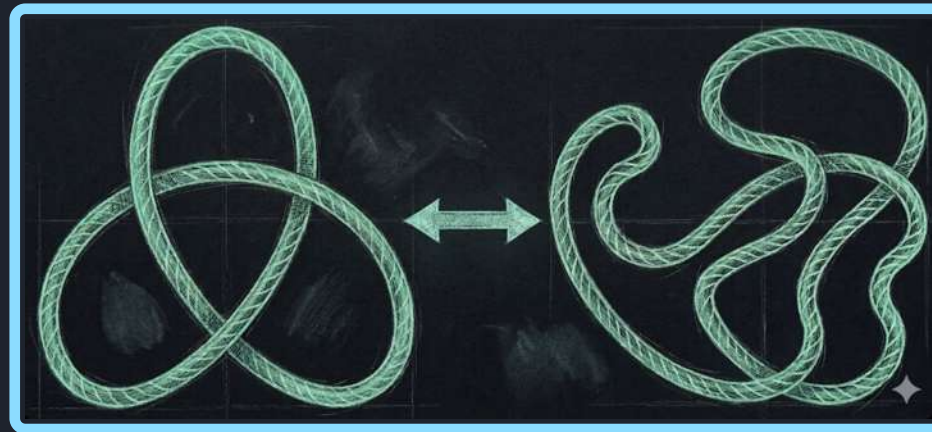
Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Aber dies ist eine subtile nicht-perturbative Bedingung:

Lokal ist die Flussdichte beliebig, aber
global integriert sie zu einer ganzen Zahl!

wie bei Knoten:
lokal frei,
global fixiert



Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

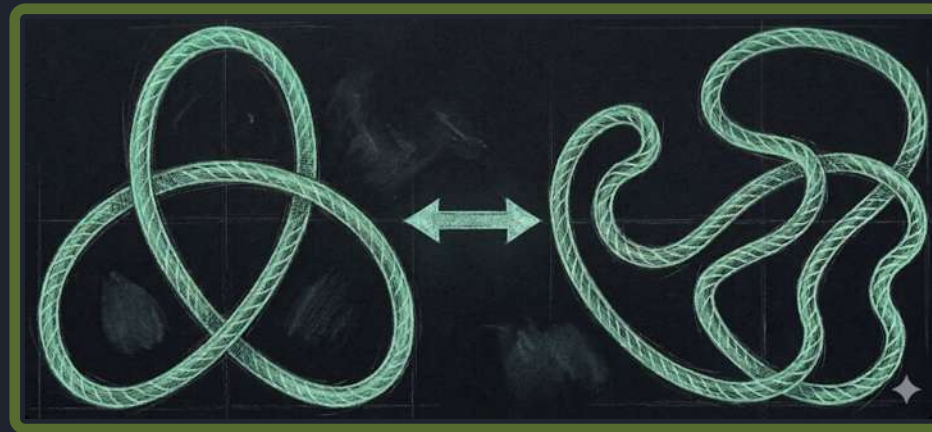
Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Aber dies ist eine subtile nicht-perturbative Bedingung:

Lokal ist die Flussdichte beliebig, aber
global integriert sie zu einer ganzen Zahl!

wie bei Knoten:
lokal frei,
global fixiert



Mathematische erfasst man dies so:

Gesamtfluss rührt her von Abbildungen in einen *klassifizierenden Raum*,
wodurch die *Topologie* (Verknotung) des Feldes ausgedrückt wird.

Im Jahr 1931 bemerkte Dirac, dass dies tatsächlich nicht stimmt.

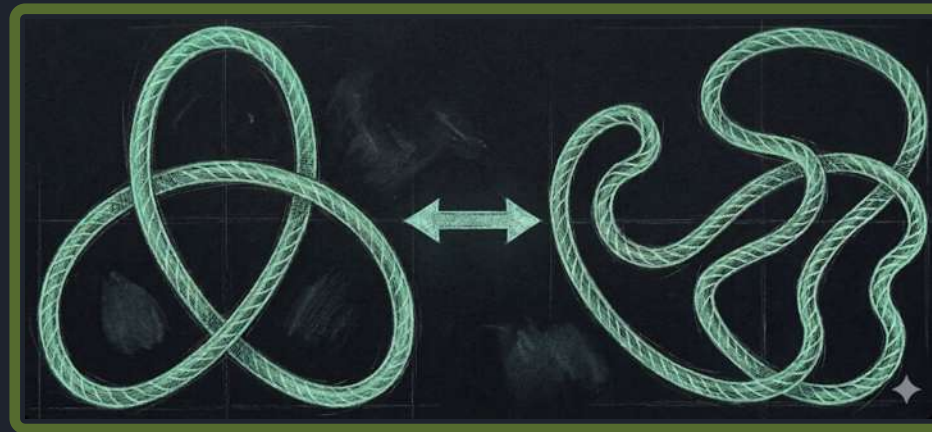
Quantised Singularities in the Electromagnetic Field
By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.
(Received May 29, 1931.)

Dirac: { Der magnetische Gesamtfluss durch geschlossene Flächen
ist eine ganze Zahl von Einheits-*Flussquanten*.

Aber dies ist eine subtile nicht-perturbative Bedingung:

Lokal ist die Flussdichte beliebig, aber
global integriert sie zu einer ganzen Zahl!

wie bei Knoten:
lokal frei,
global fixiert



Mathematische erfasst man dies so:

Gesamtfluss rührt her von Abbildungen in einen *klassifizierenden Raum*,
wodurch die *Topologie* (Verknotung) des Feldes ausgedrückt wird.

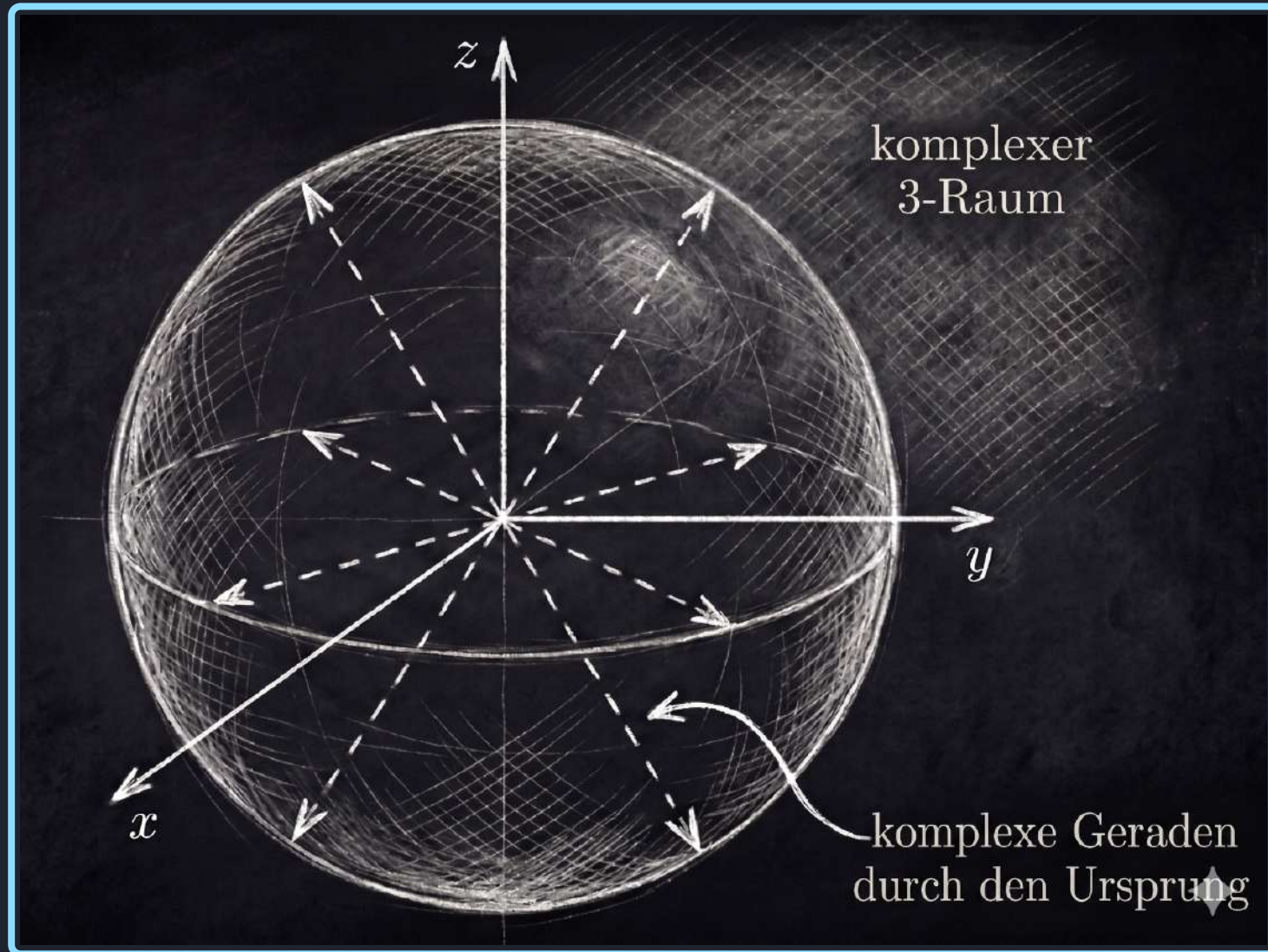
Betrachte den *komplex projectiven Raum der Dimension 2*

$$\mathbb{C}P^2 := \left\{ \text{komplexe Geraden in } \mathbb{C}^3 \right\}$$

Der klassifizierende Raum für das
gewöhnliche magnetische Feld.

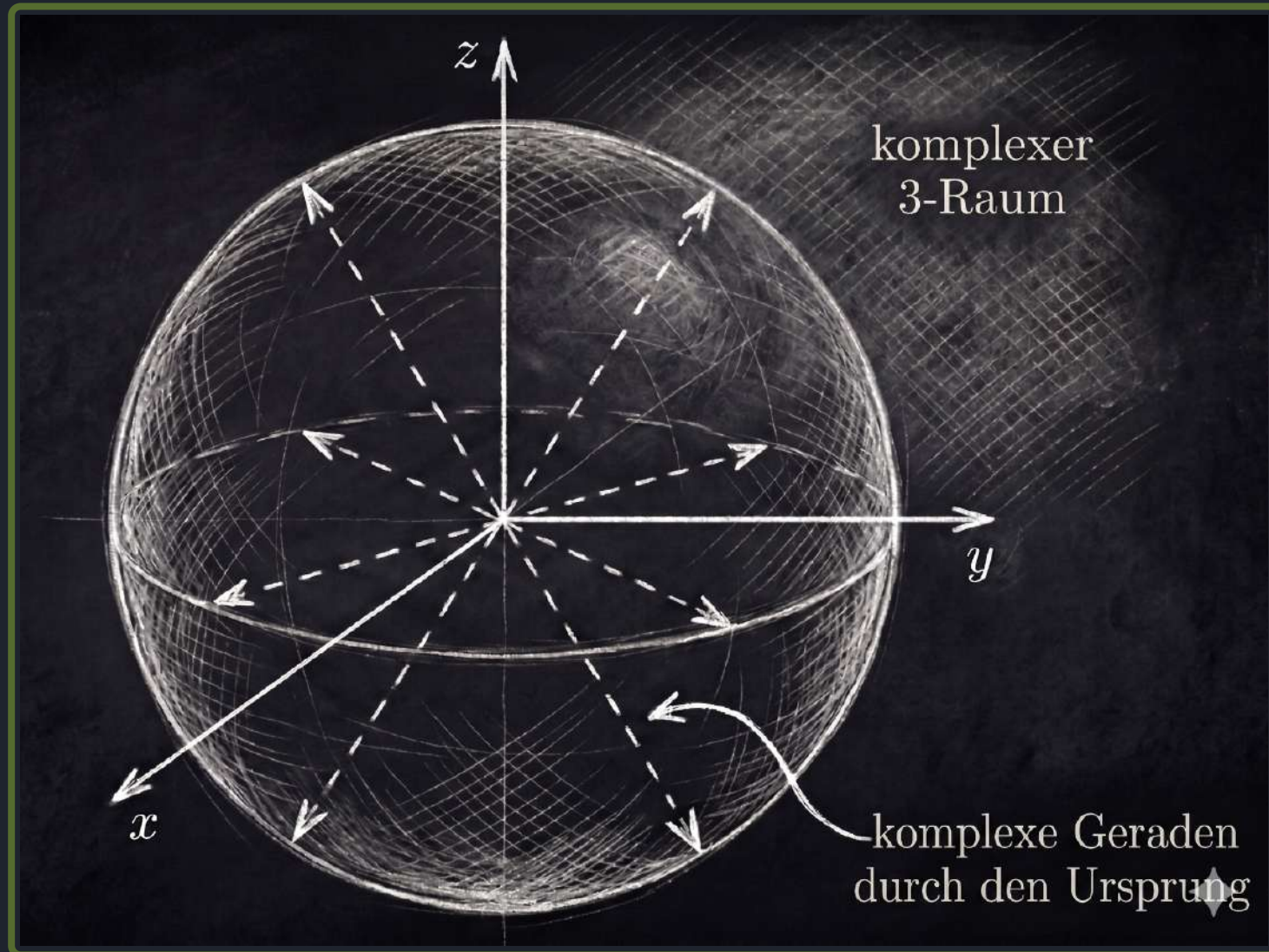
Betrachte den *komplex projectiven Raum der Dimension 2*

$$\mathbb{C}P^2 := \left\{ \text{komplexe Geraden in } \mathbb{C}^3 \right\}$$



Betrachte den *komplex projectiven Raum der Dimension 2*

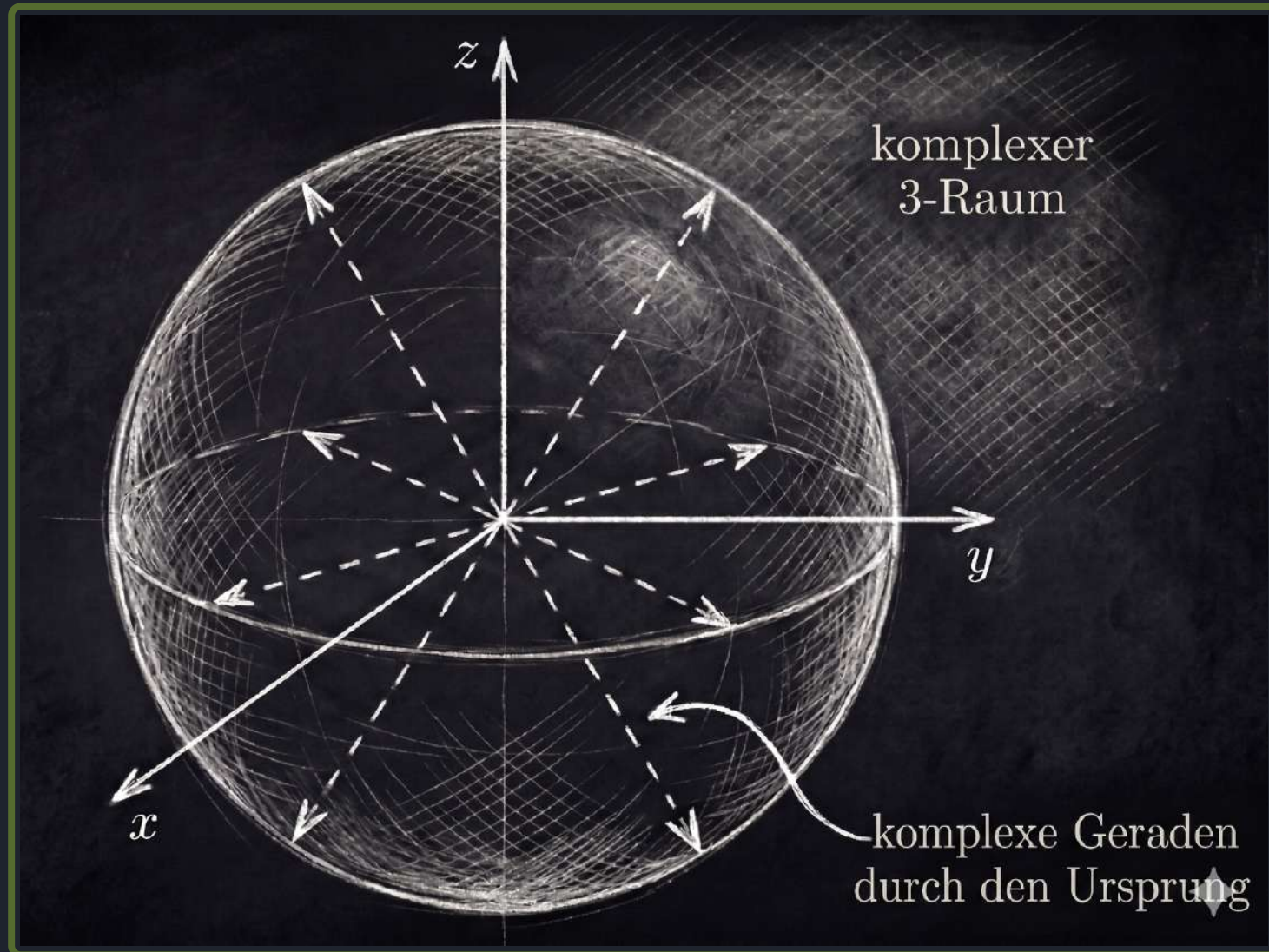
$$\mathbb{C}P^2 := \left\{ \text{komplexe Geraden in } \mathbb{C}^3 \right\}$$



Fakt: Dieser trägt eine *universelle Flussdichte* f_2 , deren Gesamtfluss durch 2-Sphären ganzzahlig ist.

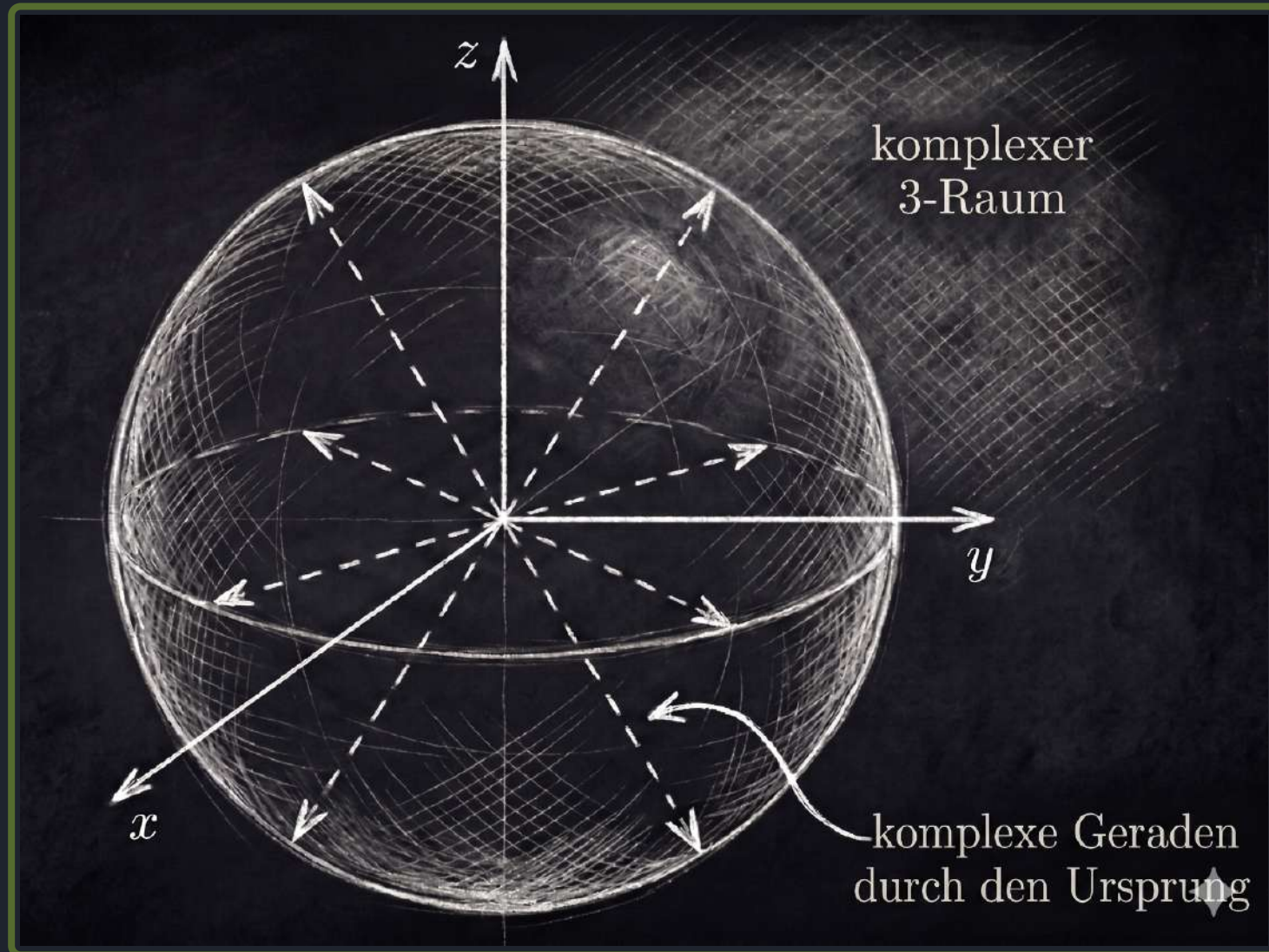
Betrachte den *komplex projectiven Raum der Dimension 2*

$$\mathbb{C}P^2 := \left\{ \text{komplexe Geraden in } \mathbb{C}^3 \right\}$$

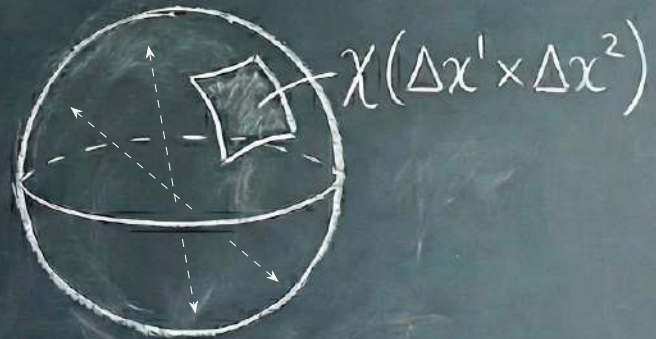
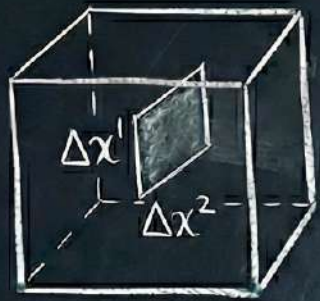


Fakt: Dieser trägt eine *universelle Flussdichte* f_2 , deren Gesamtfluss durch 2-Sphären ganzzahlig ist.

Nun sagt Diracs Flussquantisierung, grob, dass das magnetische Feld eine *klassifizierende Abbildung* χ involviert



Nun sagt Diracs Flussquantisierung, grob, dass das magnetische Feld eine *klassifizierende Abbildung* χ involviert

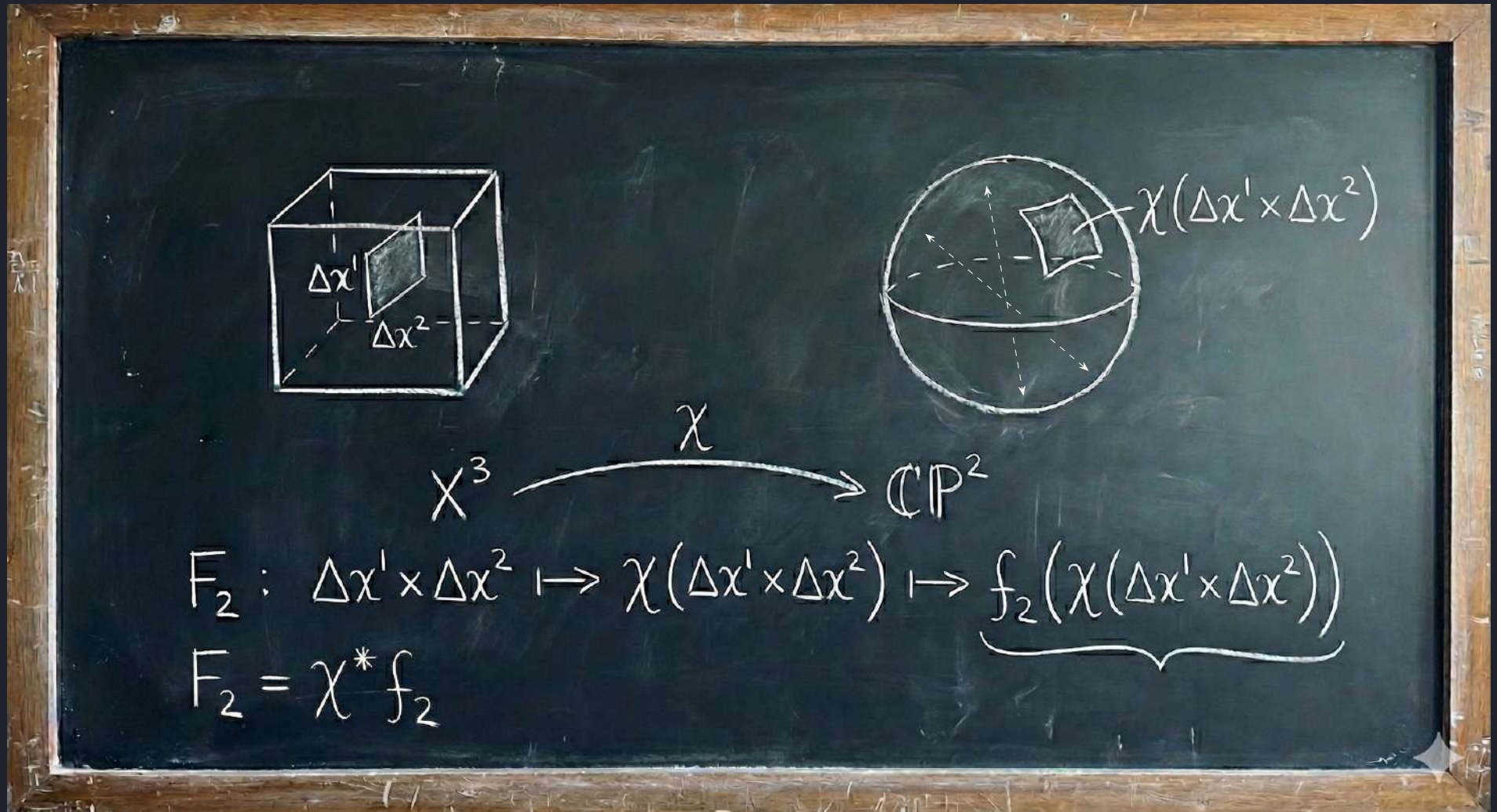


$$X^3 \xrightarrow{\chi} \mathbb{C}P^2$$

$$F_2 : \Delta x^1 \times \Delta x^2 \mapsto \chi(\Delta x^1 \times \Delta x^2) \mapsto \underbrace{f_2(\chi(\Delta x^1 \times \Delta x^2))}$$

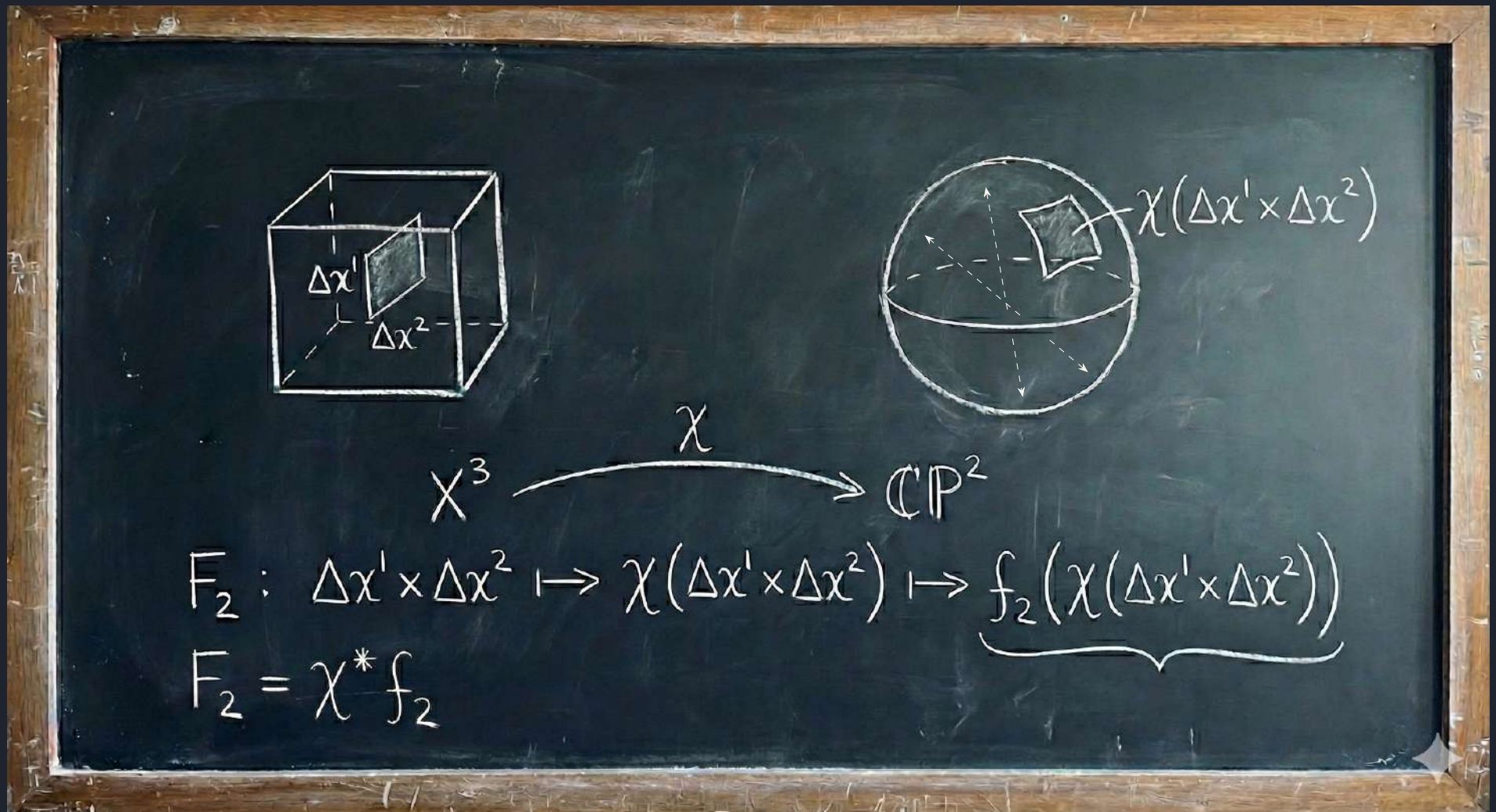
$$F_2 = \chi^* f_2$$

Nun sagt Diracs Flussquantisierung, grob, dass das magnetische Feld eine *klassifizierende Abbildung* χ involviert



unter der die Flussdichte F_2 von der universellen Flussdichte f_2 herrührt.

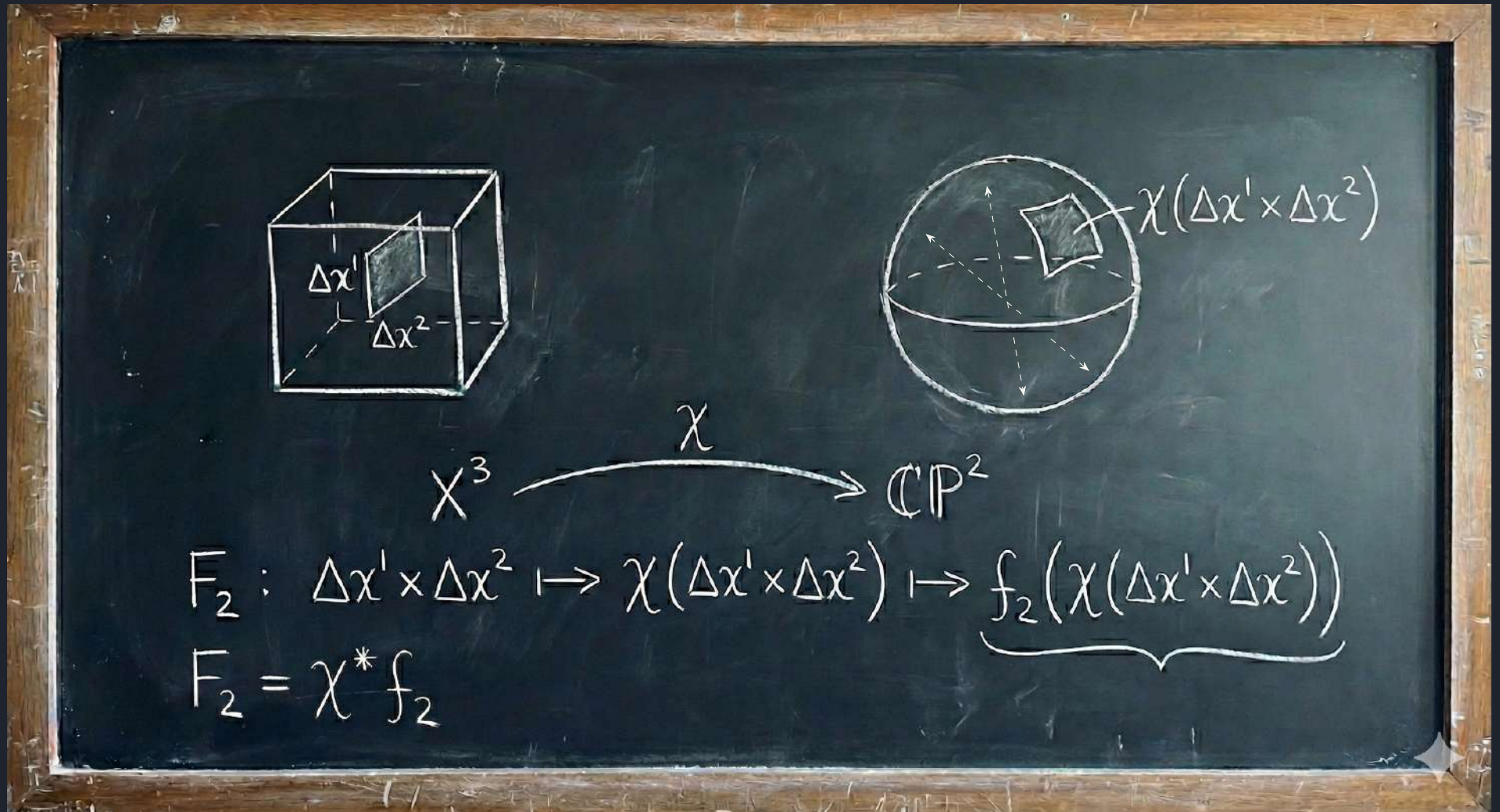
Nun sagt Diracs Flussquantisierung, grob, dass das magnetische Feld eine *klassifizierende Abbildung* χ involviert



unter der die Flussdichte F_2 von der universellen Flussdichte f_2 herrührt.

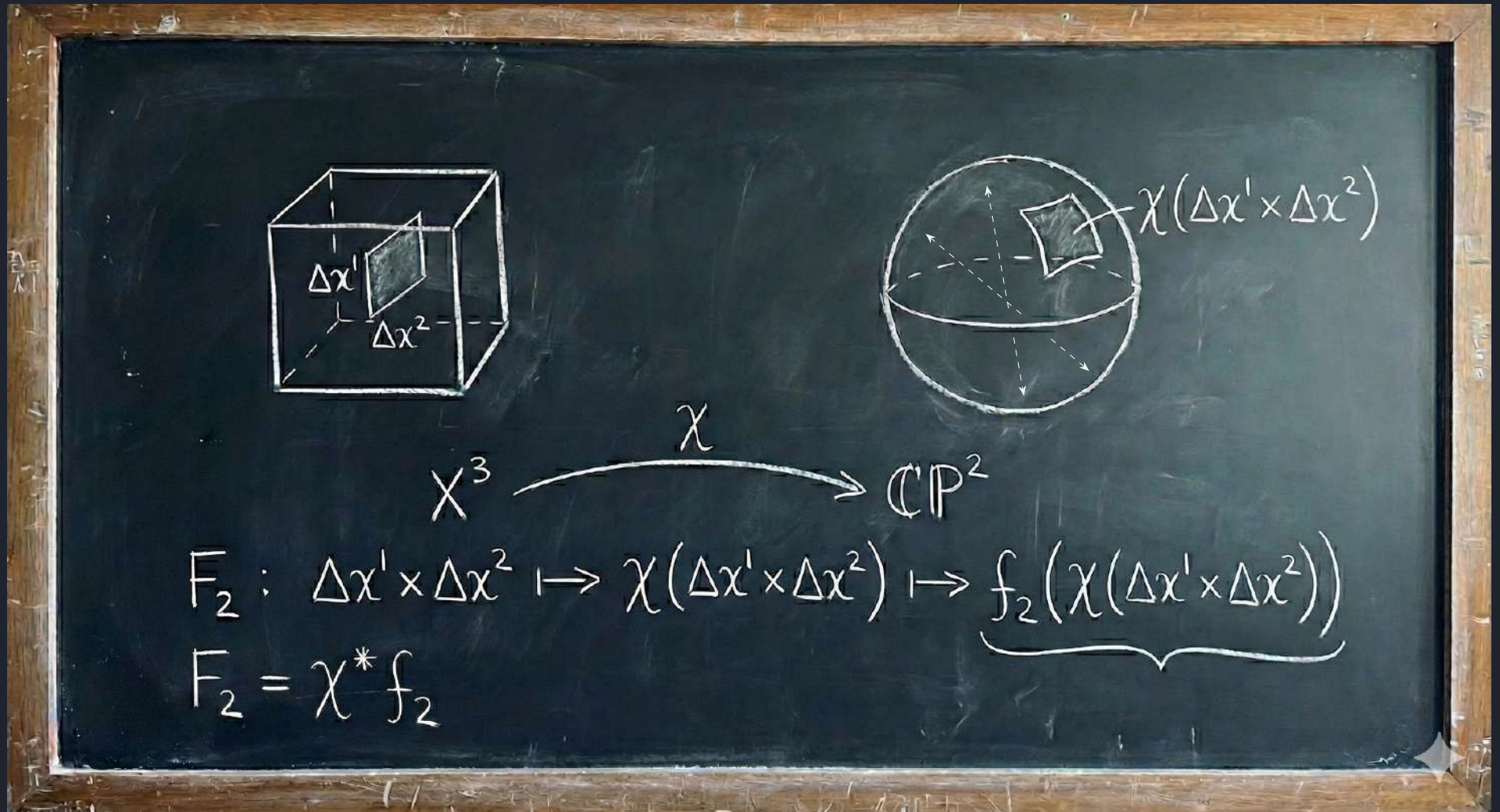
Dies ist die moderne Formulierung des elektromagnetischen Feldes:

Flussdichten F_2 mit Ladungsklassifikatoren χ und Kompatibilitäten $\chi \xrightarrow{\hat{A}} F_2$.



Dies ist die moderne Formulierung des elektromagnetischen Feldes:

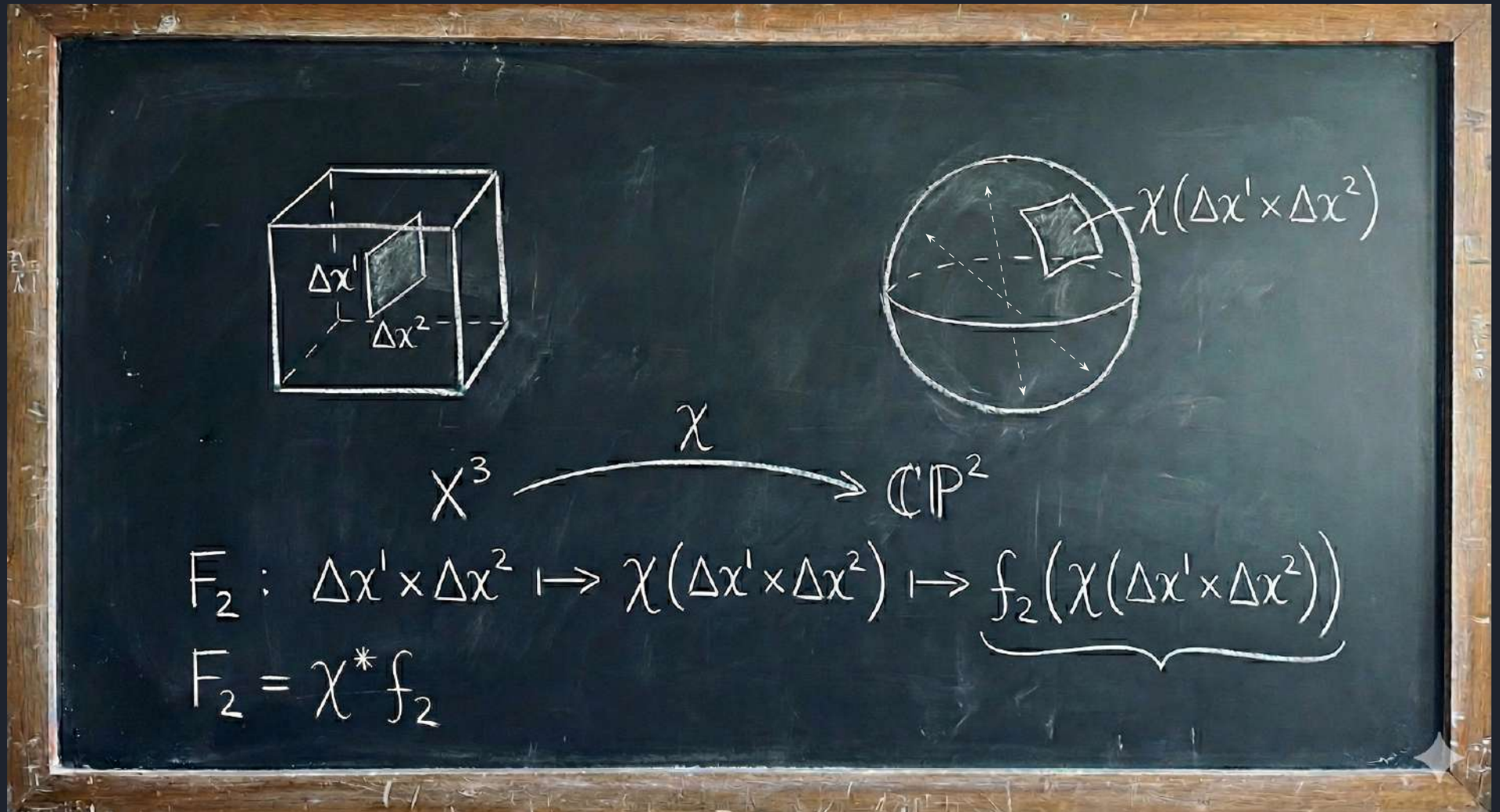
Flussdichten F_2 mit Ladungsklassifikatoren χ und Kompatibilitäten $\chi \xrightarrow{\hat{A}} F_2$.



Also ist die Frage: Was ist die analoge deformierte effektive Beschreibung von Überschuss FQH Fluss?

Dies ist die moderne Formulierung des elektromagnetischen Feldes:

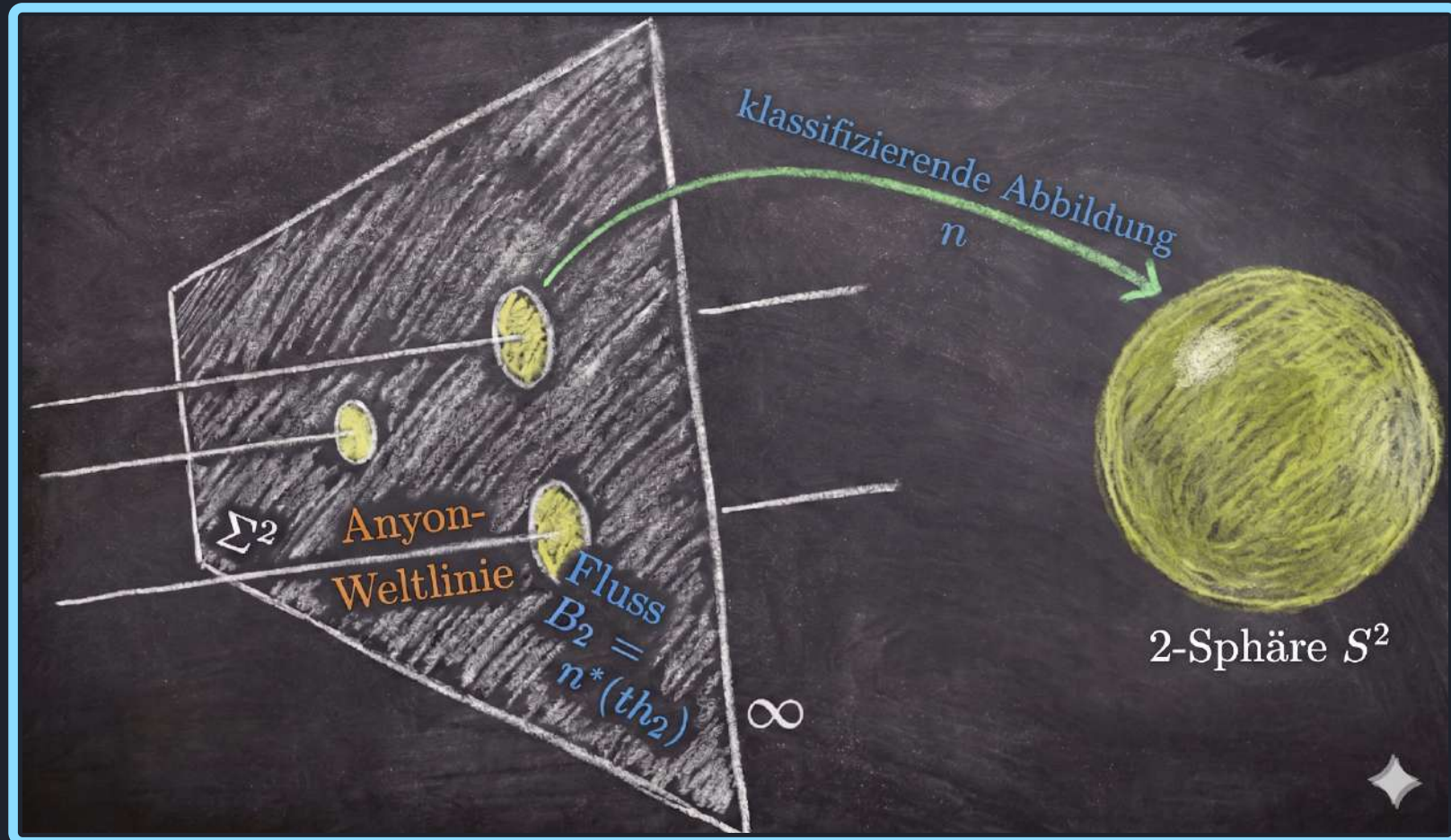
Flussdichten F_2 mit Ladungsklassifikatoren χ und Kompatibilitäten $\chi \xrightarrow{\hat{A}} F_2$.



Also ist die Frage: Was ist die analoge deformierte effektive Beschreibung von Überschuss FQH Fluss?

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$



Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$



Überschuss Flussquanten werden auf die Sphäre abgebildet und ihre Weltlinien induzieren Anyon Zopfphasen!

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$



Überschuss Flussquanten werden auf die Sphäre abgebildet und ihre Weltlinien induzieren Anyon Zopfphasen!

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Non-Lagrangian Construction of Anyons via Flux Quantization in Cohomotopy

H. Sati and U. Schreiber


[Journal of Physics: Conference Series, Volume 3152, \(2025\)](#)

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Non-Lagrangian Construction of Anyons via Flux Quantization in Cohomotopy

H. Sati and U. Schreiber

Journal of Physics: Conference Series, Volume 3152, (2025)

 > cond-mat > arXiv:2601.03150

Se

Condensed Matter > Strongly Correlated Electrons

[Submitted on 6 Jan 2026]

Higher-Dimensional Anyons via Higher Cohomotopy

Sadok Kallel, Hisham Sati, Urs Schreiber

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Non-Lagrangian Construction of Anyons via Flux Quantization in Cohomotopy

H. Sati and U. Schreiber

Journal of Physics: Conference Series, Volume 3152, (2025)

arXiv > cond-mat > arXiv:2601.03150

Se

Condensed Matter > Strongly Correlated Electrons

[Submitted on 6 Jan 2026]

Higher-Dimensional Anyons via Higher Cohomotopy

Sadok Kallel, Hisham Sati, Urs Schreiber

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen “lokale Systeme” von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

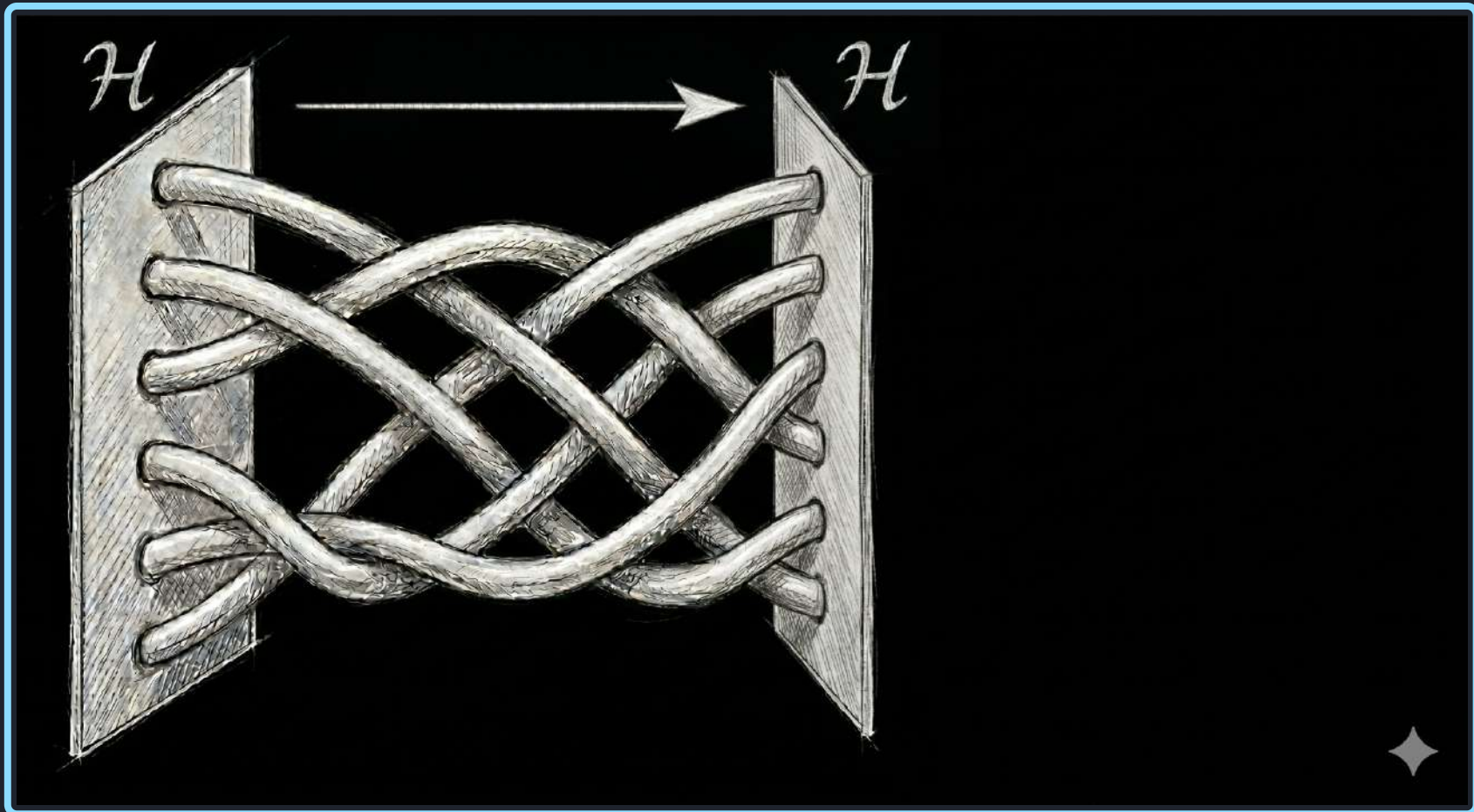
Diese anyonischen Quantenzustände formen “lokale Systeme” von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum

was bedeutet, dass sie entlang von Pfaden von Konfigurationen evolvieren:

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen “lokale Systeme” von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum

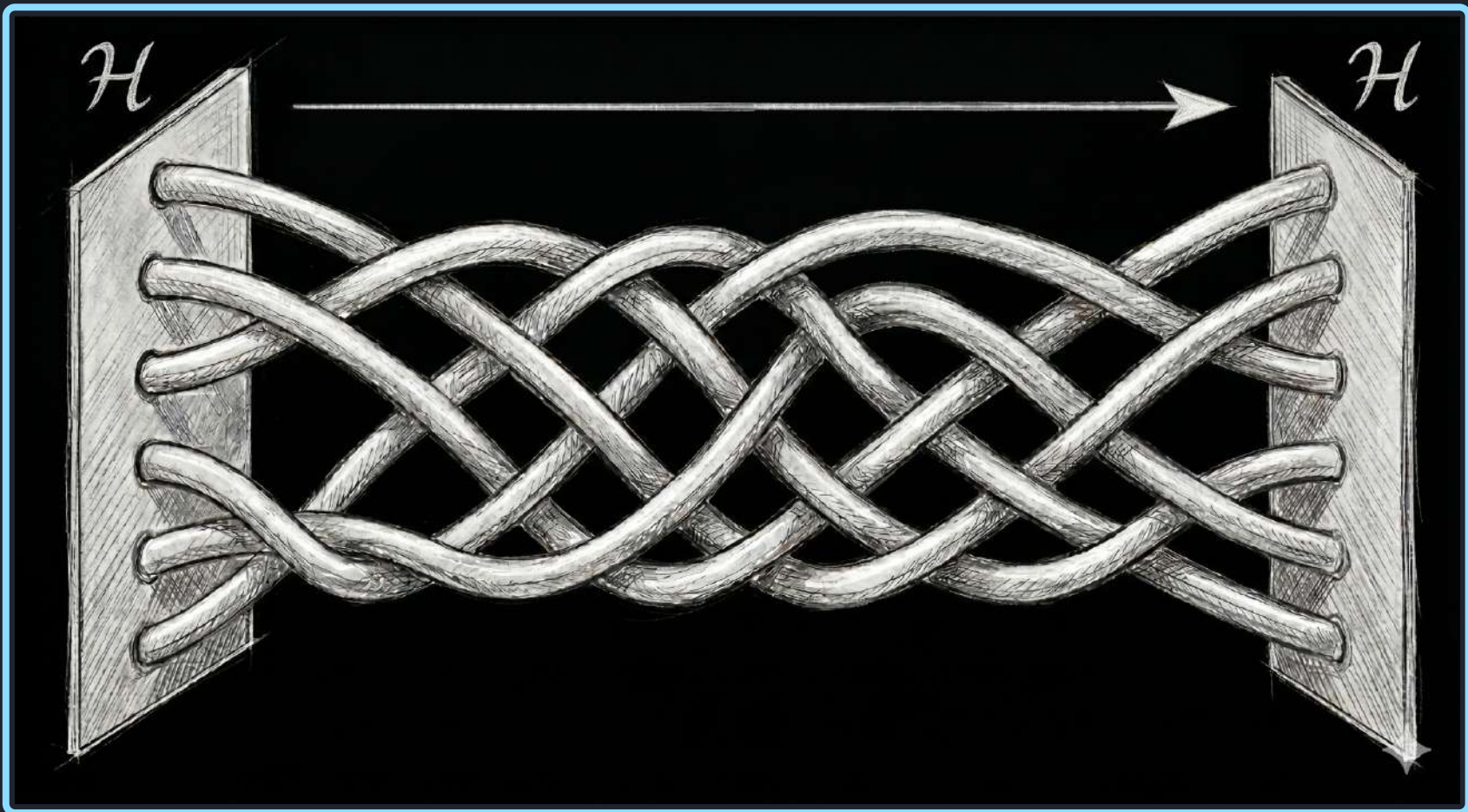
was bedeutet, dass sie entlang von Pfaden von Konfigurationen evolvieren:



Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen “lokale Systeme” von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum

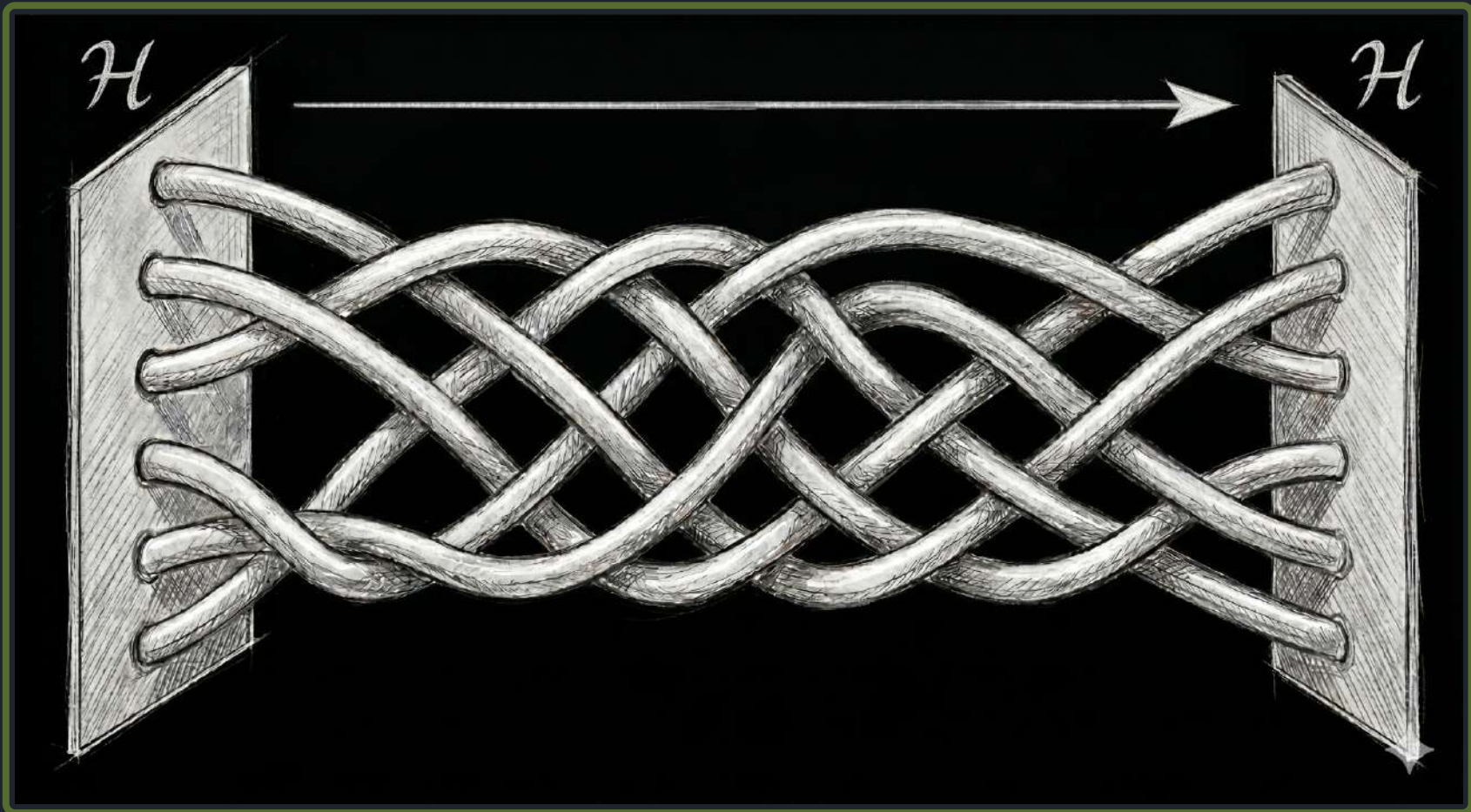
was bedeutet, dass sie entlang von Pfaden von Konfigurationen evolviere:



Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

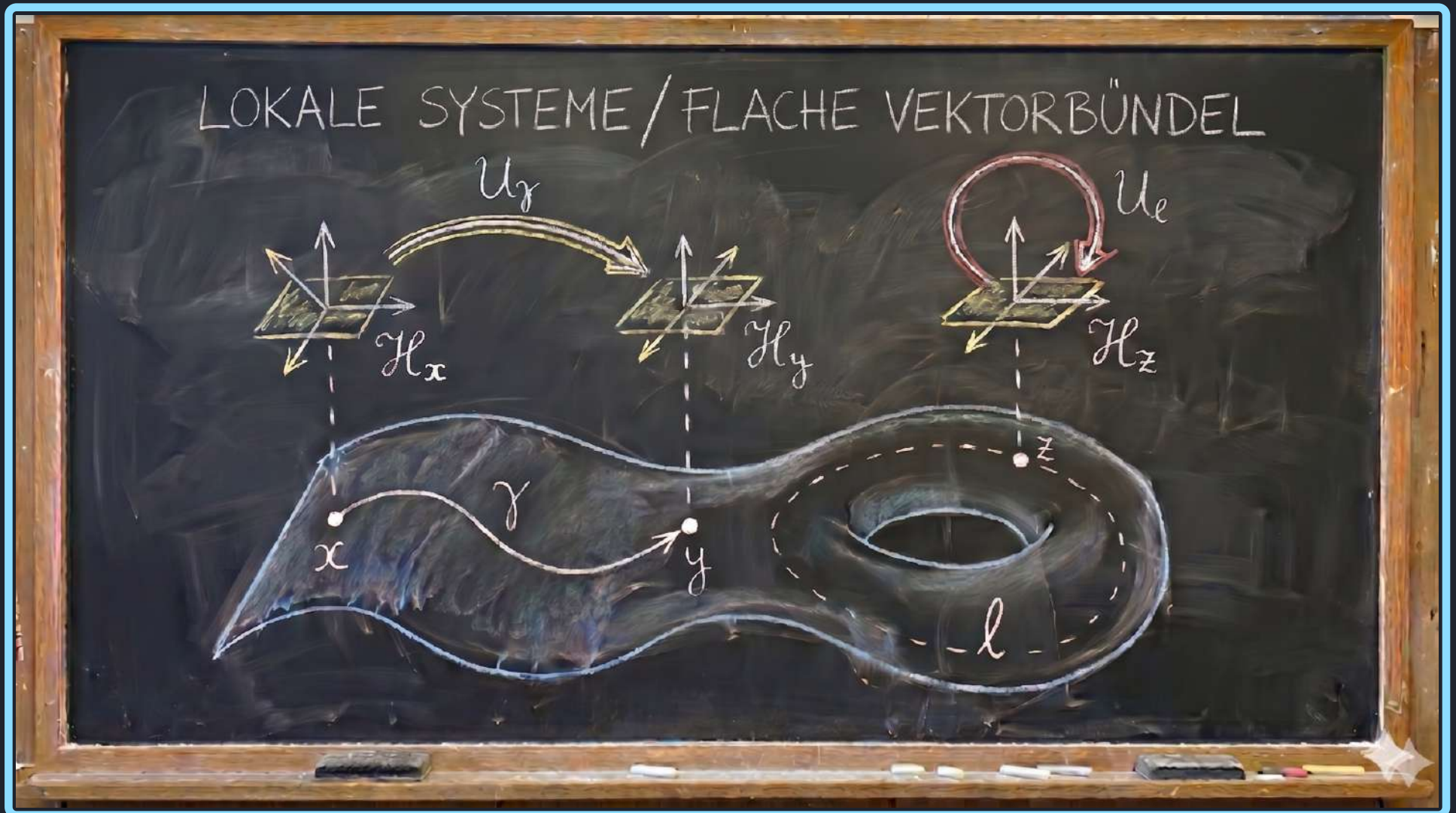
Diese anyonischen Quantenzustände formen “lokale Systeme” von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum

was bedeutet, dass sie entlang von Pfaden von Konfigurationen evolvieren:



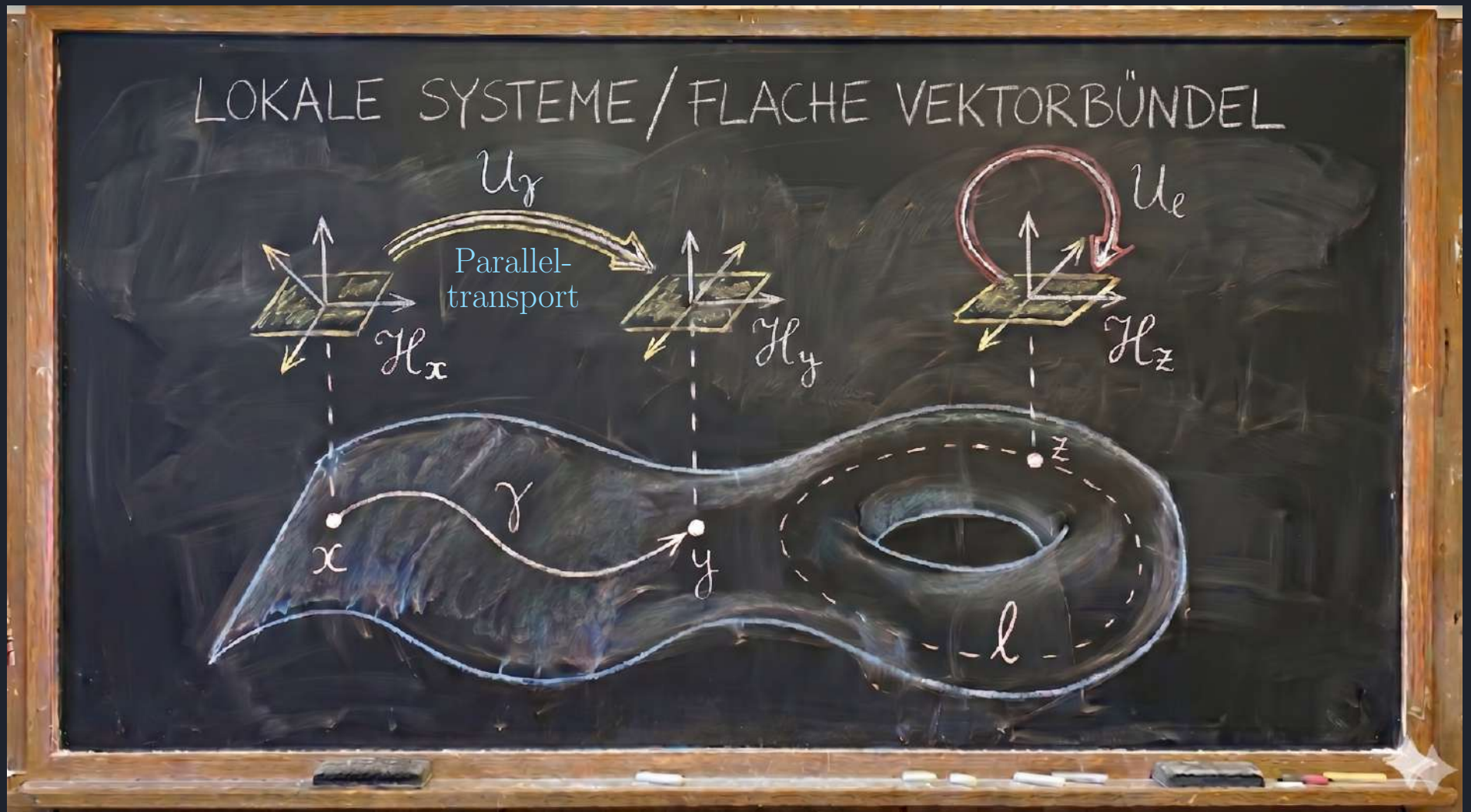
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



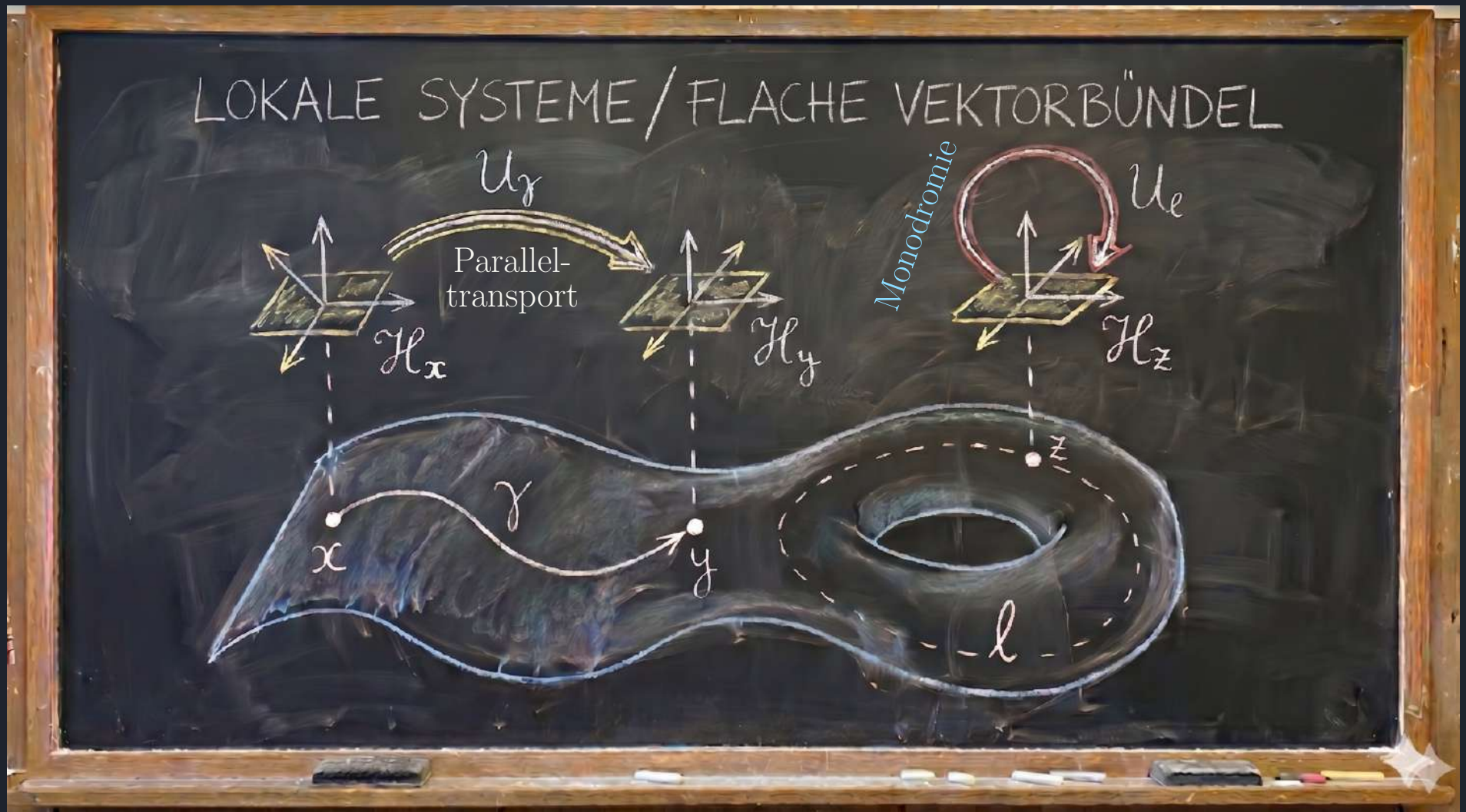
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



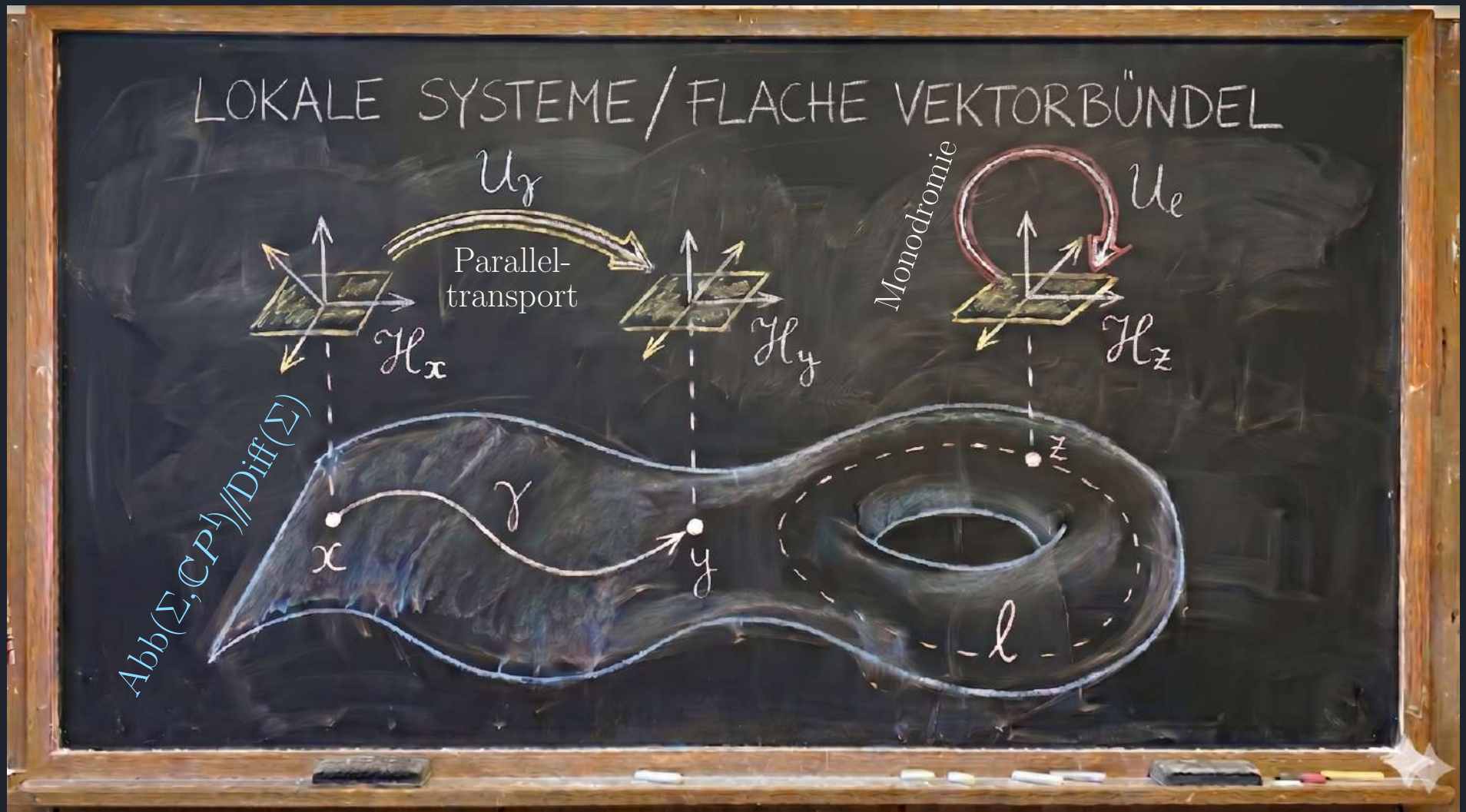
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



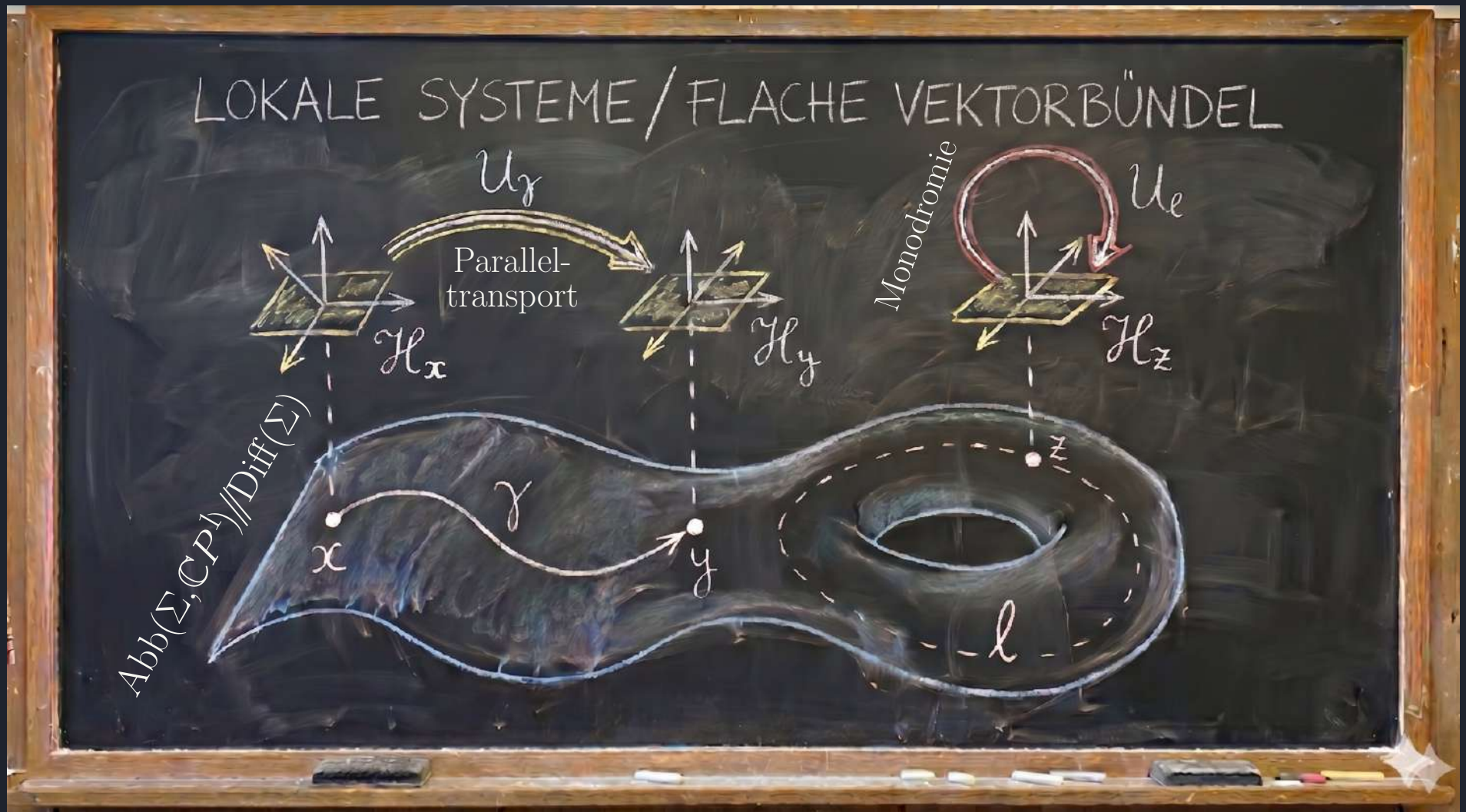
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



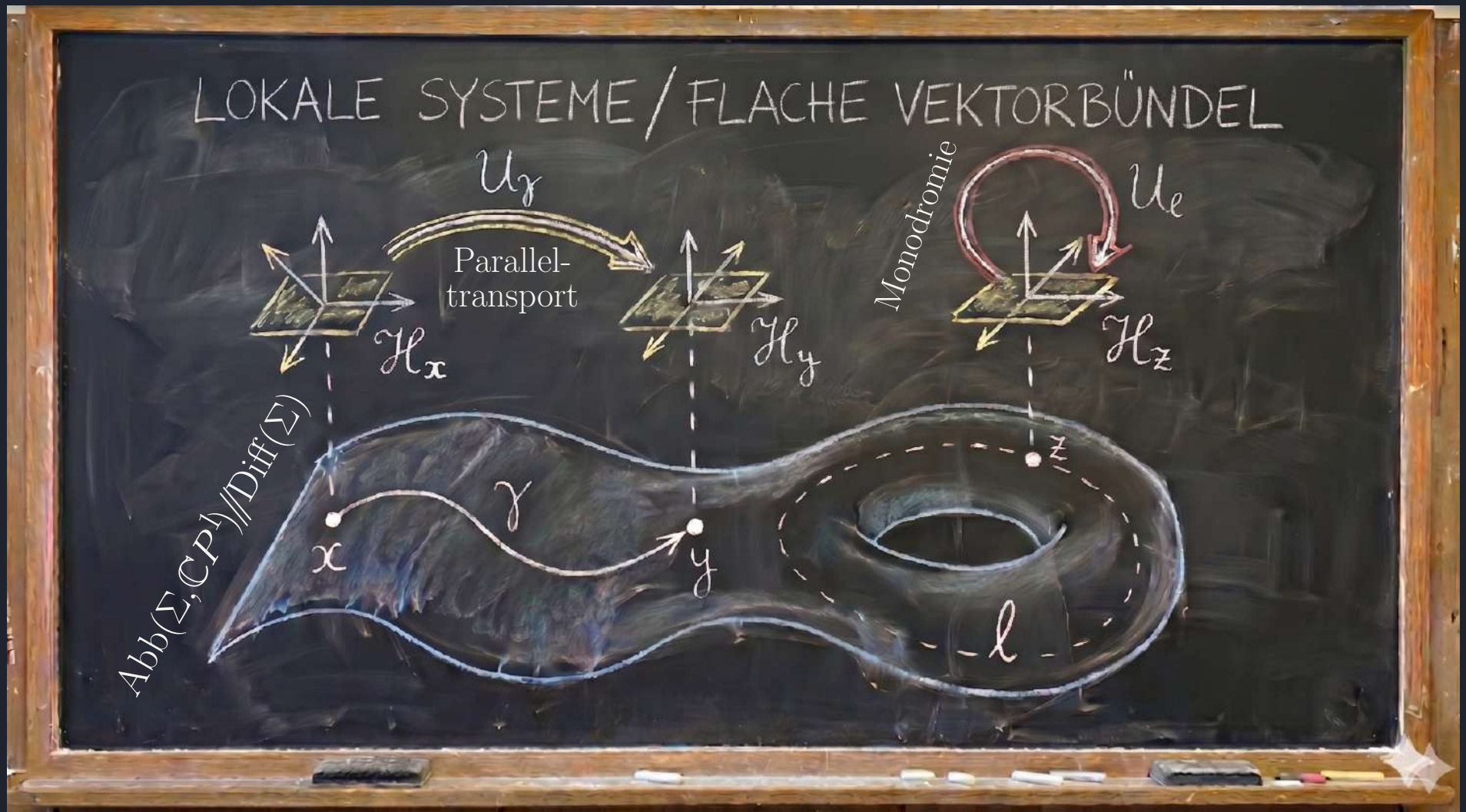
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



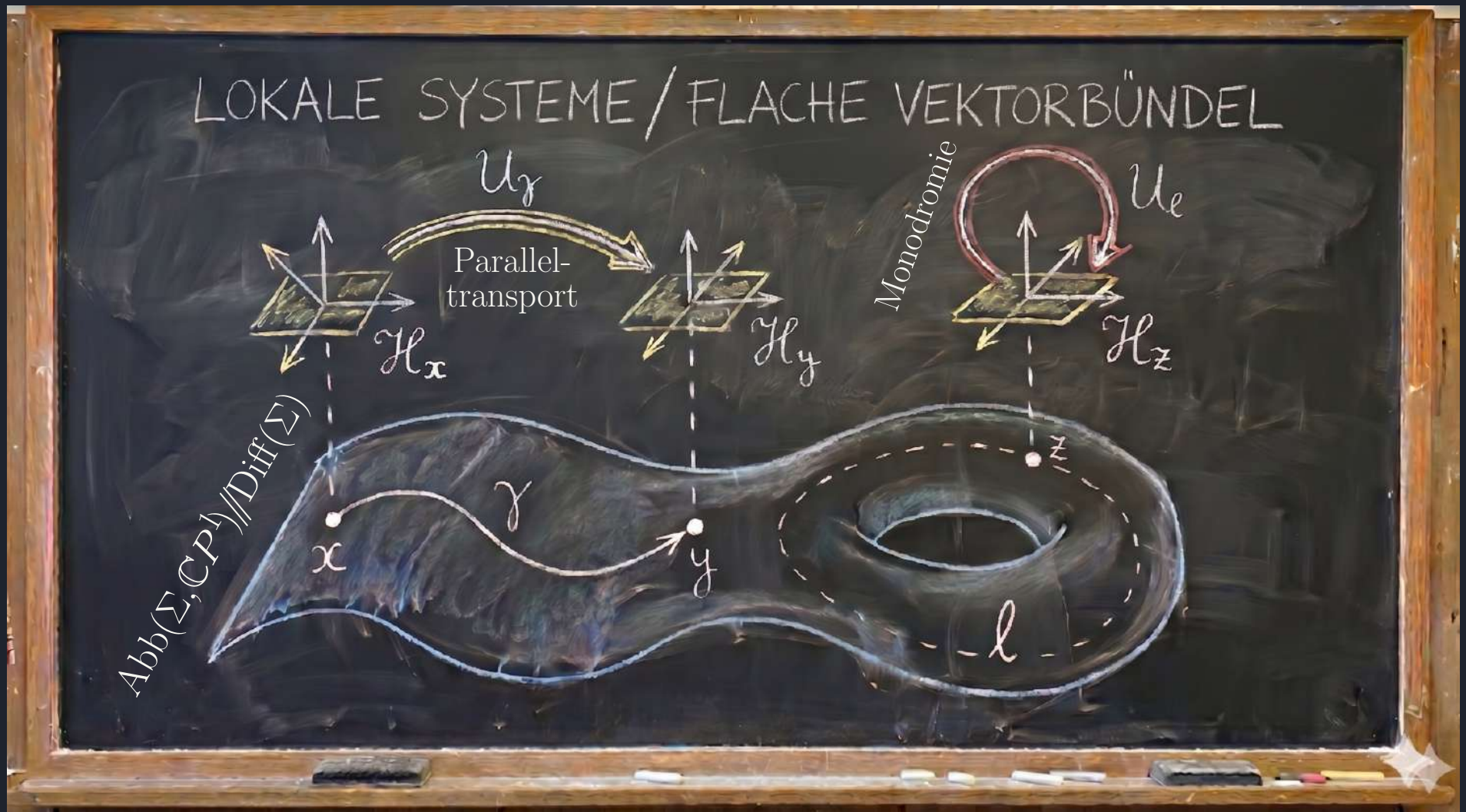
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Diese anyonischen Quantenzustände formen "lokale Systeme" von Hilbert Räumen über dem Abbildungsraum



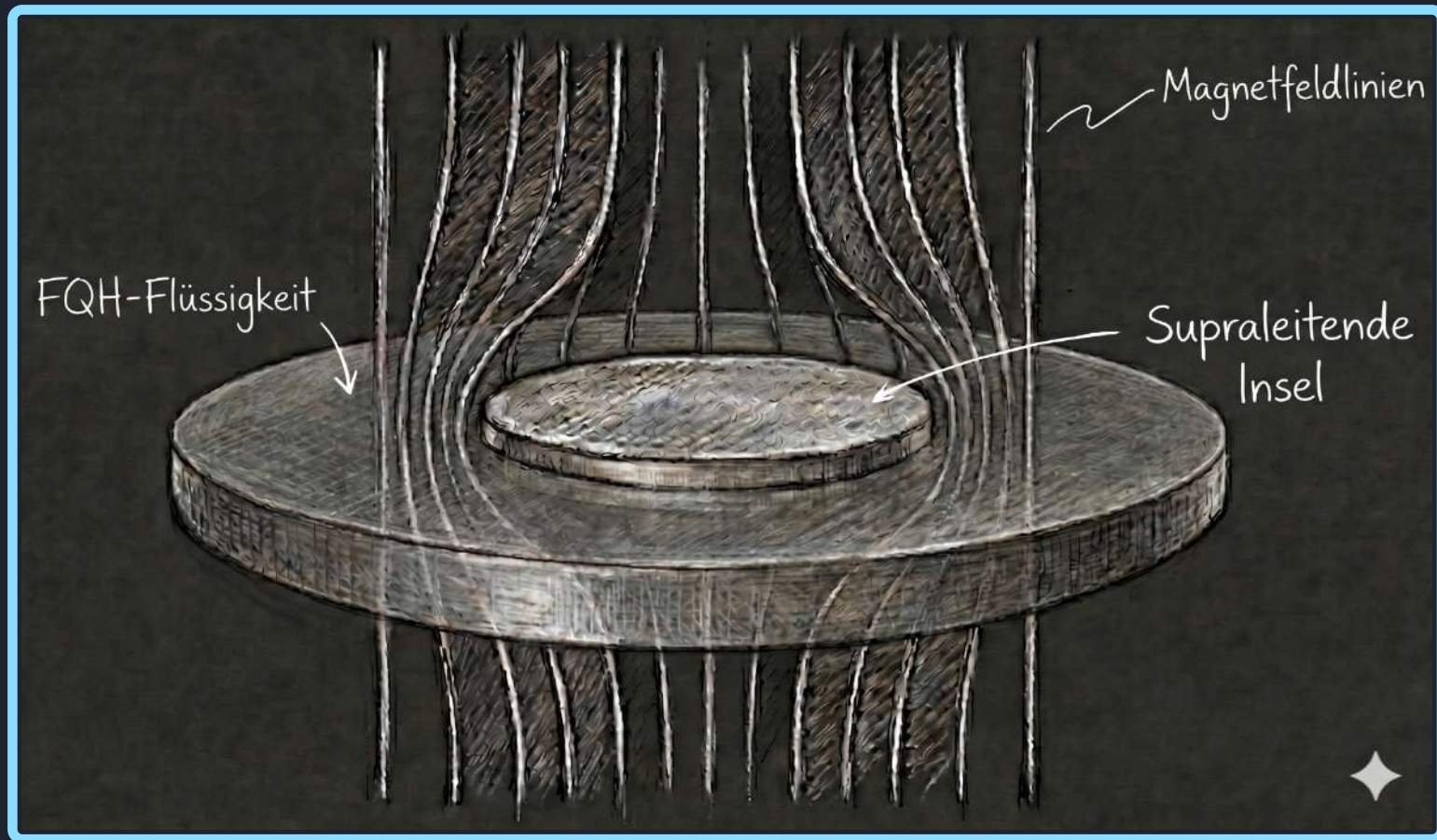
Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Neben strenger Neuherleitung von solitonischen FQH Anyonen: Vorhersage von nichtabelschen Anyonen an supraleitenden Inseln im FQH Gas



Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Neben strenger Neuherleitung von solitonischen FQH Anyonen: Vorhersage von nichtabelschen Anyonen an supraleitenden Inseln im FQH Gas



Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Neben strenger Neuherleitung von solitonischen FQH Anyonen: Vorhersage von nichtabelschen Anyonen an supraleitenden Inseln im FQH Gas



The image shows a screenshot of an arXiv preprint page. The top navigation bar is blue and contains the arXiv logo, the breadcrumb path 'cond-mat > arXiv:2602.18748', and a search box. Below this, a dark blue header displays the category 'Condensed Matter > Mesoscale and Microscale Physics'. The submission date '[Submitted on 21 Feb 2026]' is shown in a lighter blue box. The main title 'Nonabelian Anyons attached to Superconducting Islands in FQH Liquids' is in large white font, followed by the authors 'Hisham Sati, Urs Schreiber' in yellow. A small yellow star icon is in the bottom right corner.

arXiv > cond-mat > arXiv:2602.18748

Condensed Matter > Mesoscale and Microscale Physics

[Submitted on 21 Feb 2026]

Nonabelian Anyons attached to Superconducting Islands in FQH Liquids

Hisham Sati, Urs Schreiber

Theorem: Für Überschuss FQH-Fluss wird dieser klassifizierende Raum deformiert zu $\mathbb{C}P^1 \simeq S^2$

Neben strenger Neuherleitung von solitonischen FQH Anyonen: Vorhersage von nichtabelschen Anyonen an supraleitenden Inseln im FQH Gas



The image shows a screenshot of an arXiv preprint page. The header is blue and contains the arXiv logo, the breadcrumb path 'cond-mat > arXiv:2602.18748', and a search bar. Below the header, the subject categories 'Condensed Matter > Mesoscale and Nanoscale Physics' are listed in white text on a dark background. The submission date '[Submitted on 21 Feb 2026]' is shown in a smaller font. The main title 'Nonabelian Anyons attached to Superconducting Islands in FQH Liquids' is prominently displayed in large white font. The authors 'Hisham Sati, Urs Schreiber' are listed below the title in a yellow font. A small yellow star icon is visible in the bottom right corner of the preprint area.

arXiv > cond-mat > arXiv:2602.18748

Condensed Matter > Mesoscale and Nanoscale Physics

[Submitted on 21 Feb 2026]

Nonabelian Anyons attached to Superconducting Islands in FQH Liquids

Hisham Sati, Urs Schreiber

Aber mit dem klassifizierenden Raum wird auch das Gauß-Gesetz deformiert,

Aber mit dem klassifizierenden Raum wird auch das Gauß-Gesetz deformiert,

da $\mathbb{C}P^1$ eine universell *höhere* Flussdichte h_3 trägt,
dessen Divergenz das Quadrat der 2-Flussdichte ist:

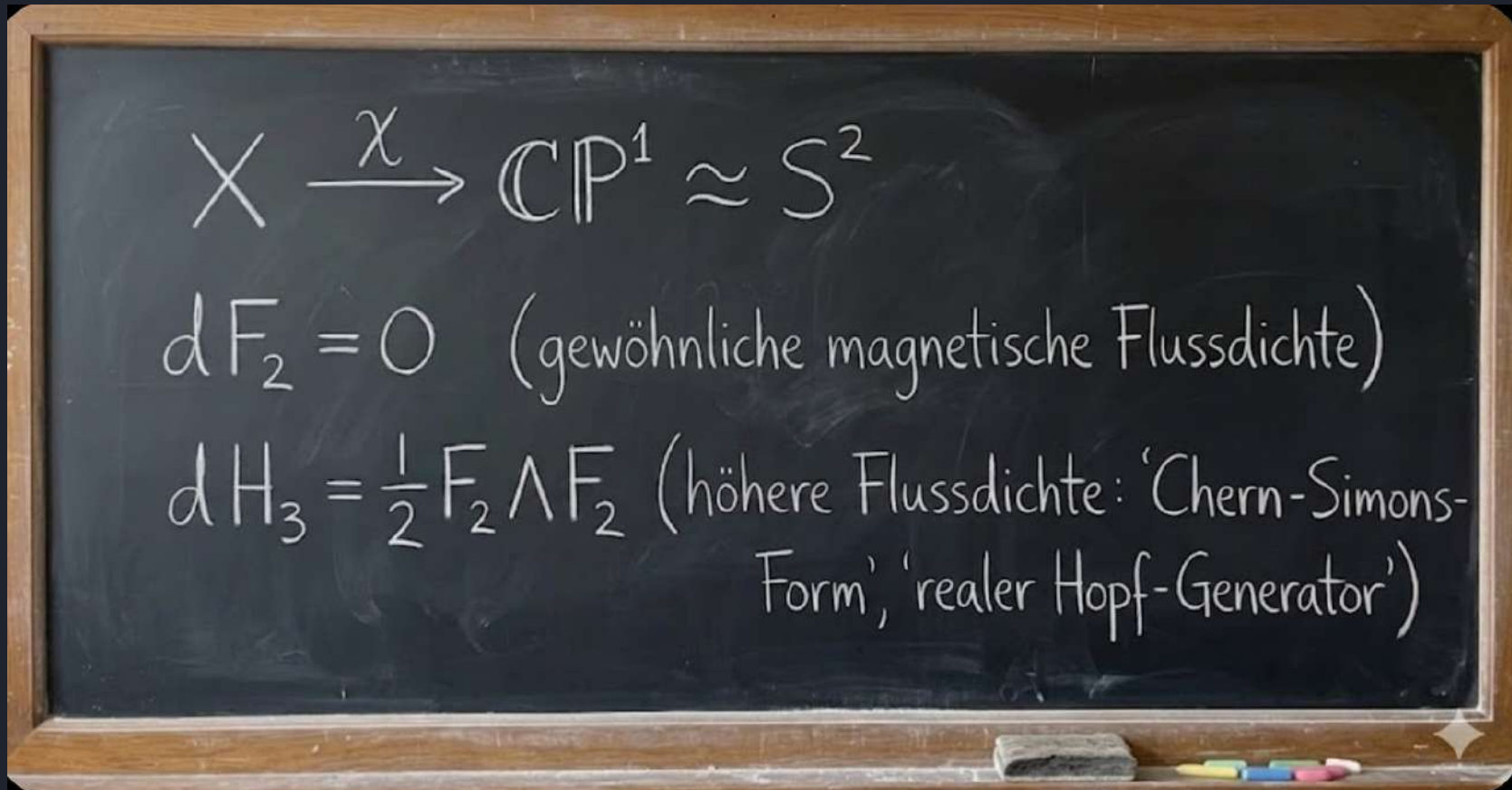
Aber mit dem klassifizierenden Raum wird auch das Gauß-Gesetz deformiert,
da $\mathbb{C}P^1$ eine universell *höhere* Flussdichte h_3 trägt,
dessen Divergenz das Quadrat der 2-Flussdichte ist:

$$X \xrightarrow{\chi} \mathbb{C}P^1 \approx S^2$$

$$dF_2 = 0 \quad (\text{gewöhnliche magnetische Flussdichte})$$

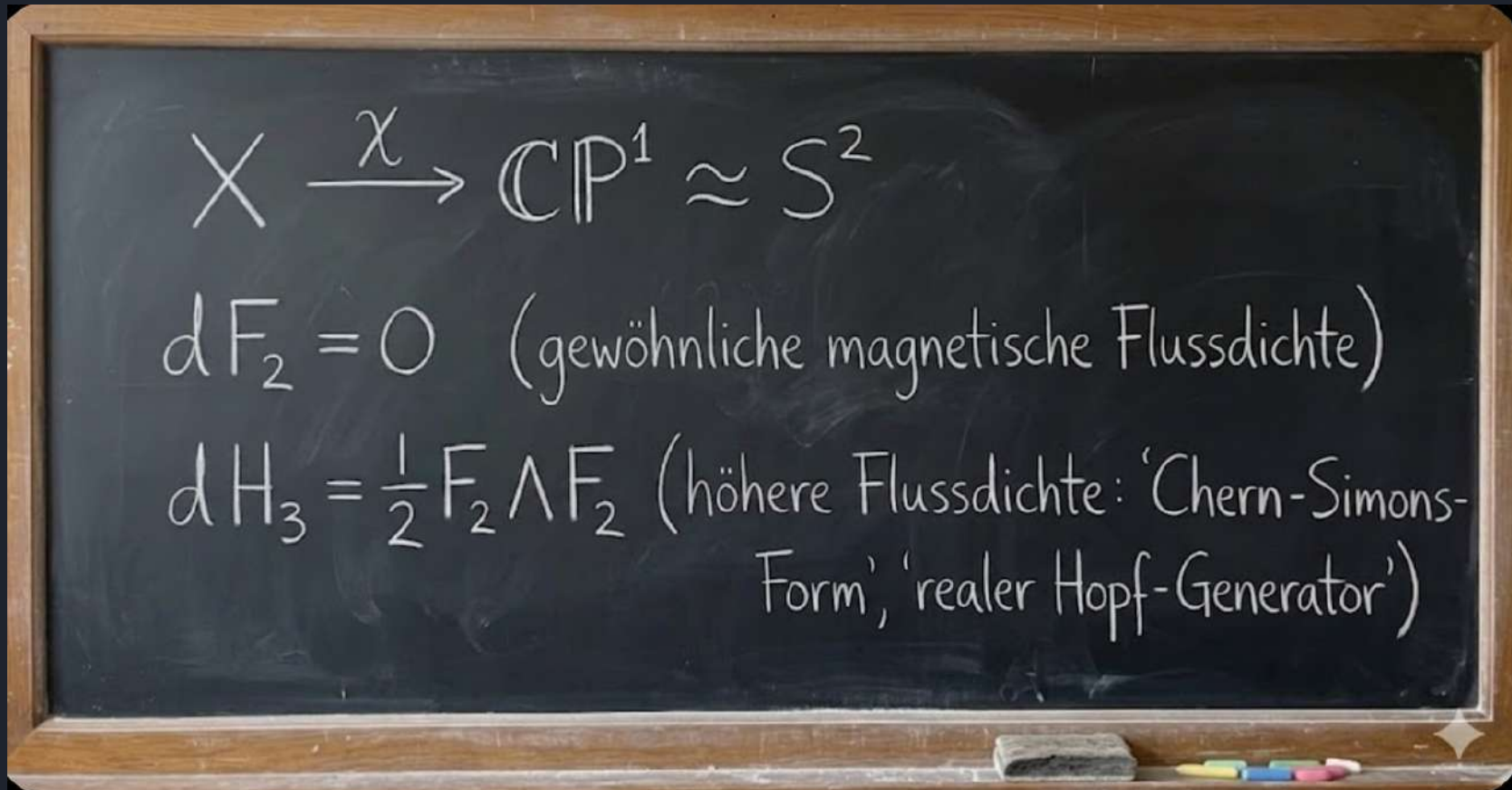
$$dH_3 = \frac{1}{2} F_2 \wedge F_2 \quad (\text{höhere Flussdichte: 'Chern-Simons-Form', 'realer Hopf-Generator'})$$

Aber mit dem klassifizierenden Raum wird auch das Gauß-Gesetz deformiert,
da $\mathbb{C}P^1$ eine universell *höhere* Flussdichte h_3 trägt,
dessen Divergenz das Quadrat der 2-Flussdichte ist:



Das ist ein mathematischer Fakt. Was ist seine physikalische Bedeutung?

Aber mit dem klassifizierenden Raum wird auch das Gauß-Gesetz deformiert,
da $\mathbb{C}P^1$ eine universell *höhere* Flussdichte h_3 trägt,
dessen Divergenz das Quadrat der 2-Flussdichte ist:



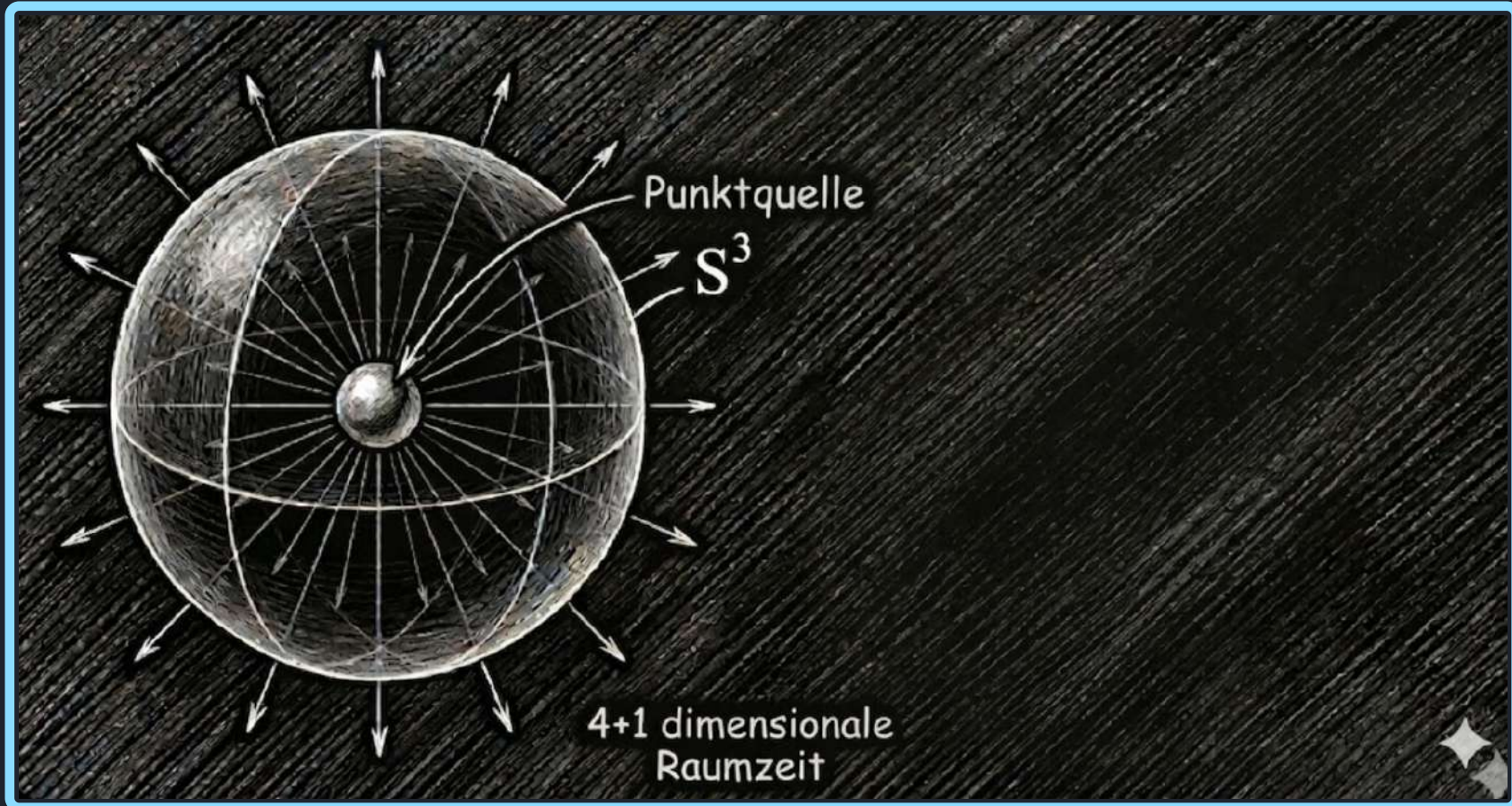
Das ist ein mathematischer Fakt. Was ist seine physikalische Bedeutung?

A: Dies sind eigentlich Flussdichten in höheren Dimensionen!

Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre,

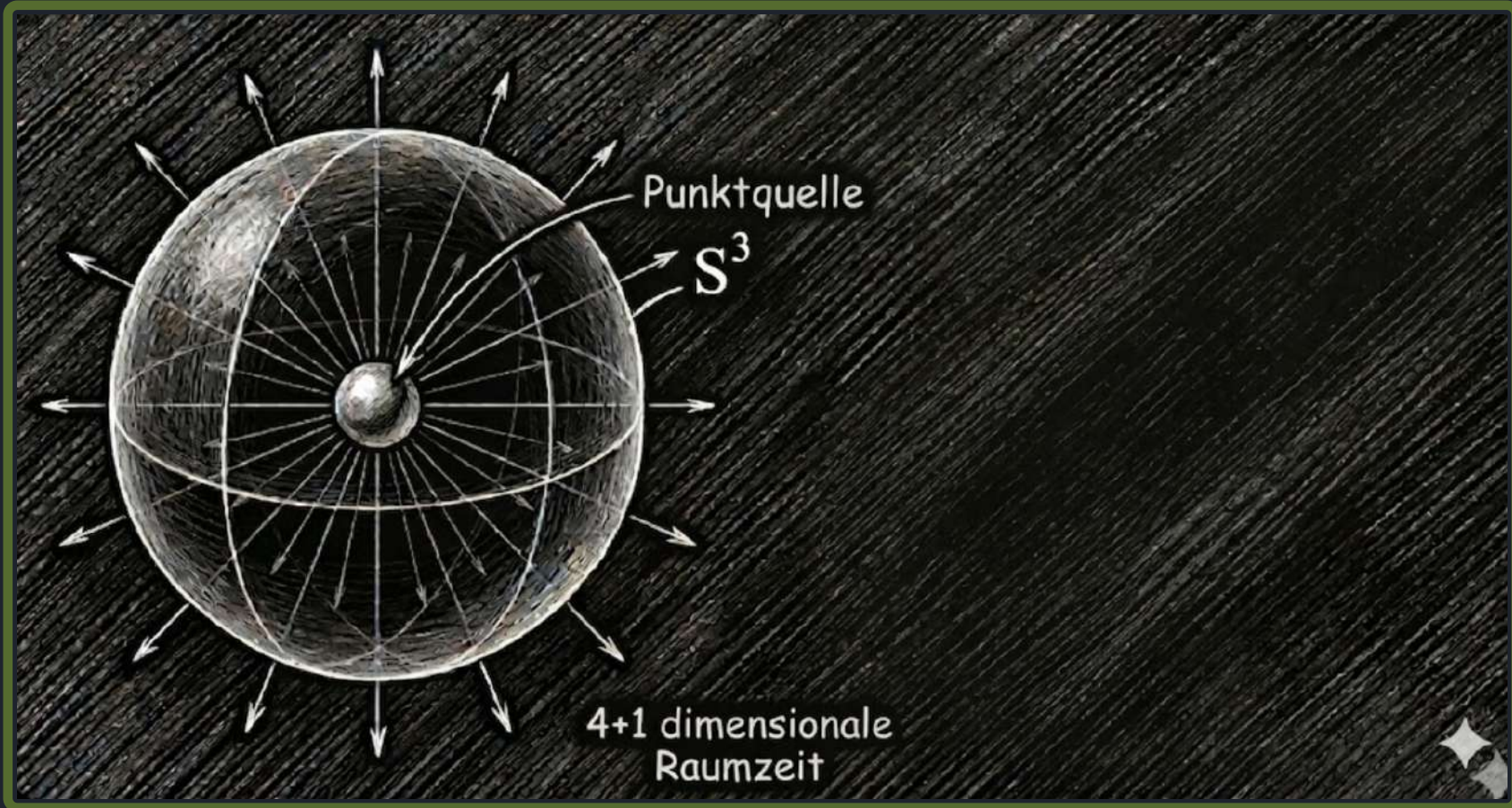
A: Dies sind eigentlich Flussdichten in höheren Dimensionen!

Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre,



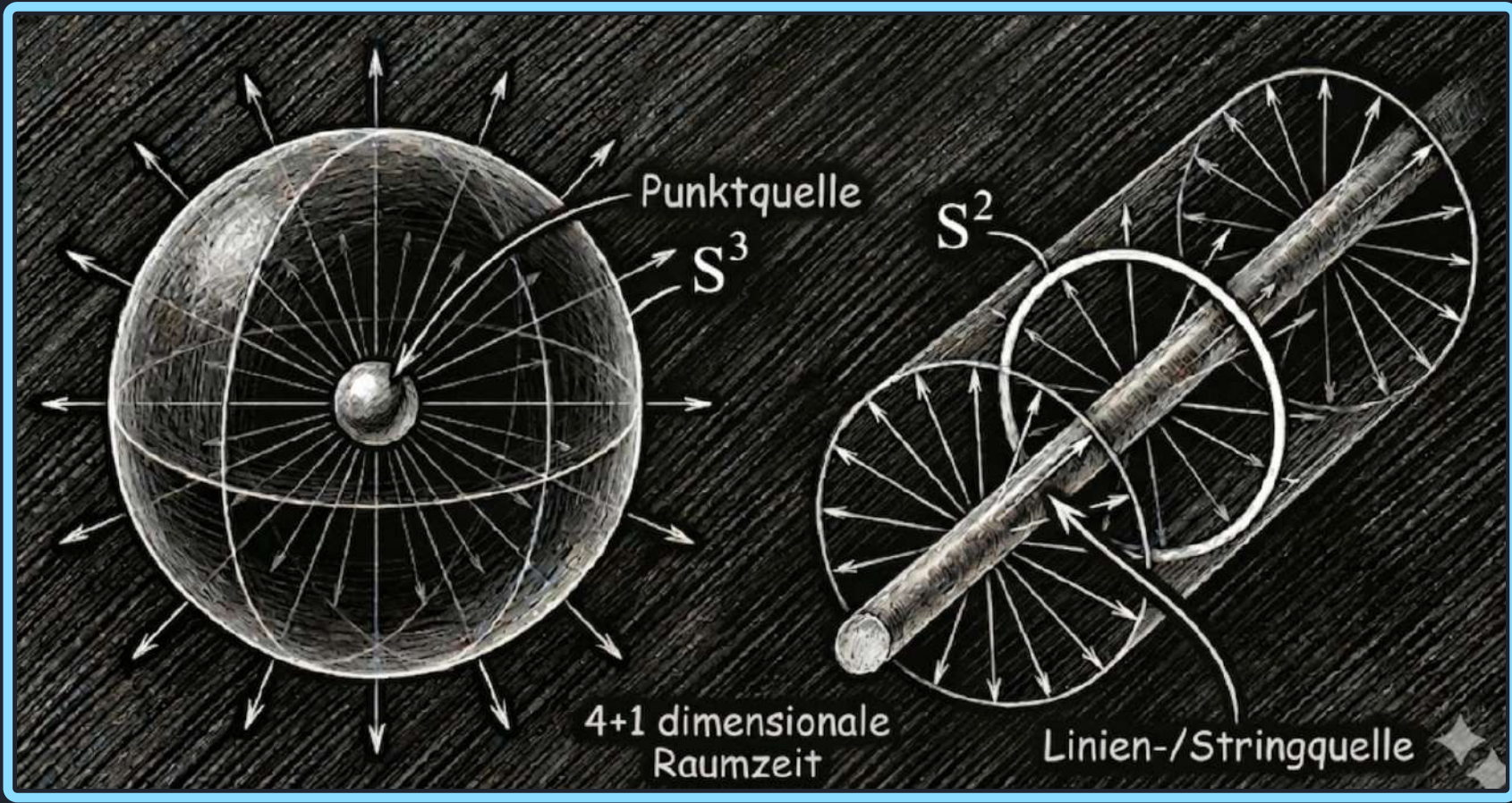
A: Dies sind eigentlich Flussdichten in höheren Dimensionen!

Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre, während 2-Sphären in 4D den Fluss von *Fadenladungen* erfassen (*Strings*)



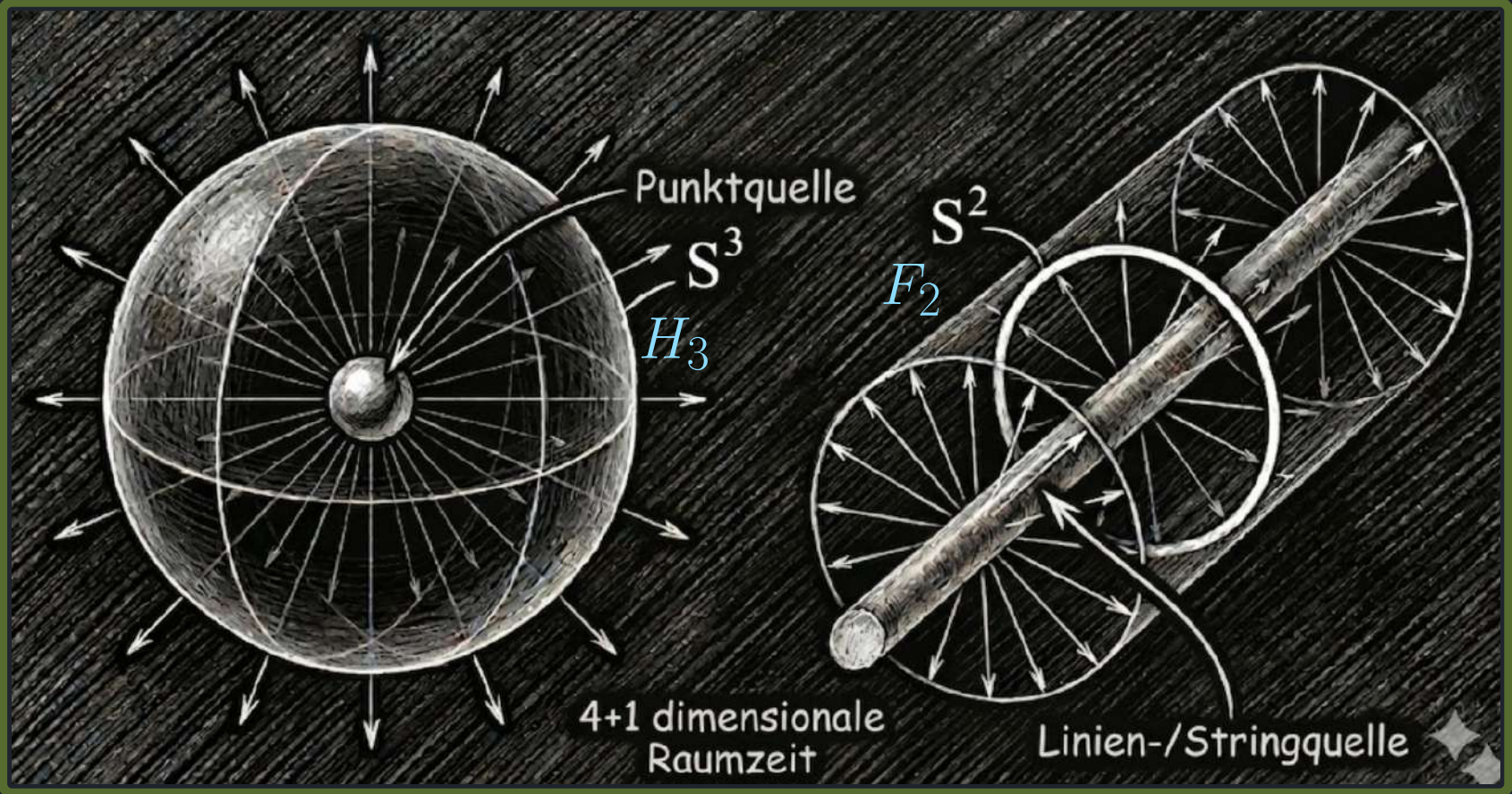
A: Dies sind eigentlich Flussdichten in höheren Dimensionen!

Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre, während 2-Sphären in 4D den Fluss von *Fadenladungen* erfassen (*Strings*)

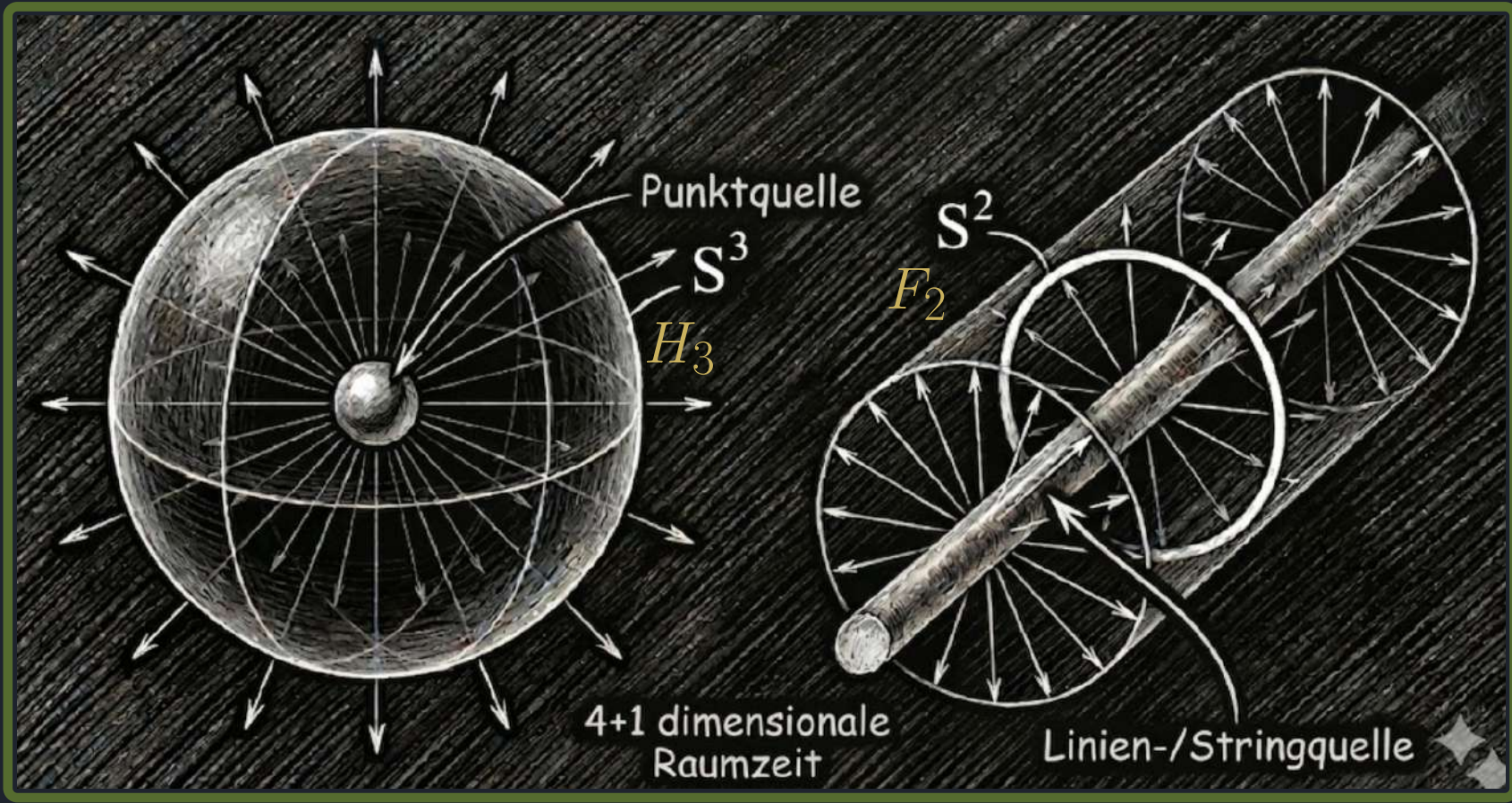


A: Dies sind eigentlich Flussdichten in höheren Dimensionen!

Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre, während 2-Sphären in 4D den Fluss von *Fadenladungen* erfassen (*Strings*)



Der durch einen Monopol in 4D ausgehende Fluss durchströmt eine 3-Sphäre, während 2-Sphären in 4D den Fluss von *Fadenladungen* erfassen (*Strings*)



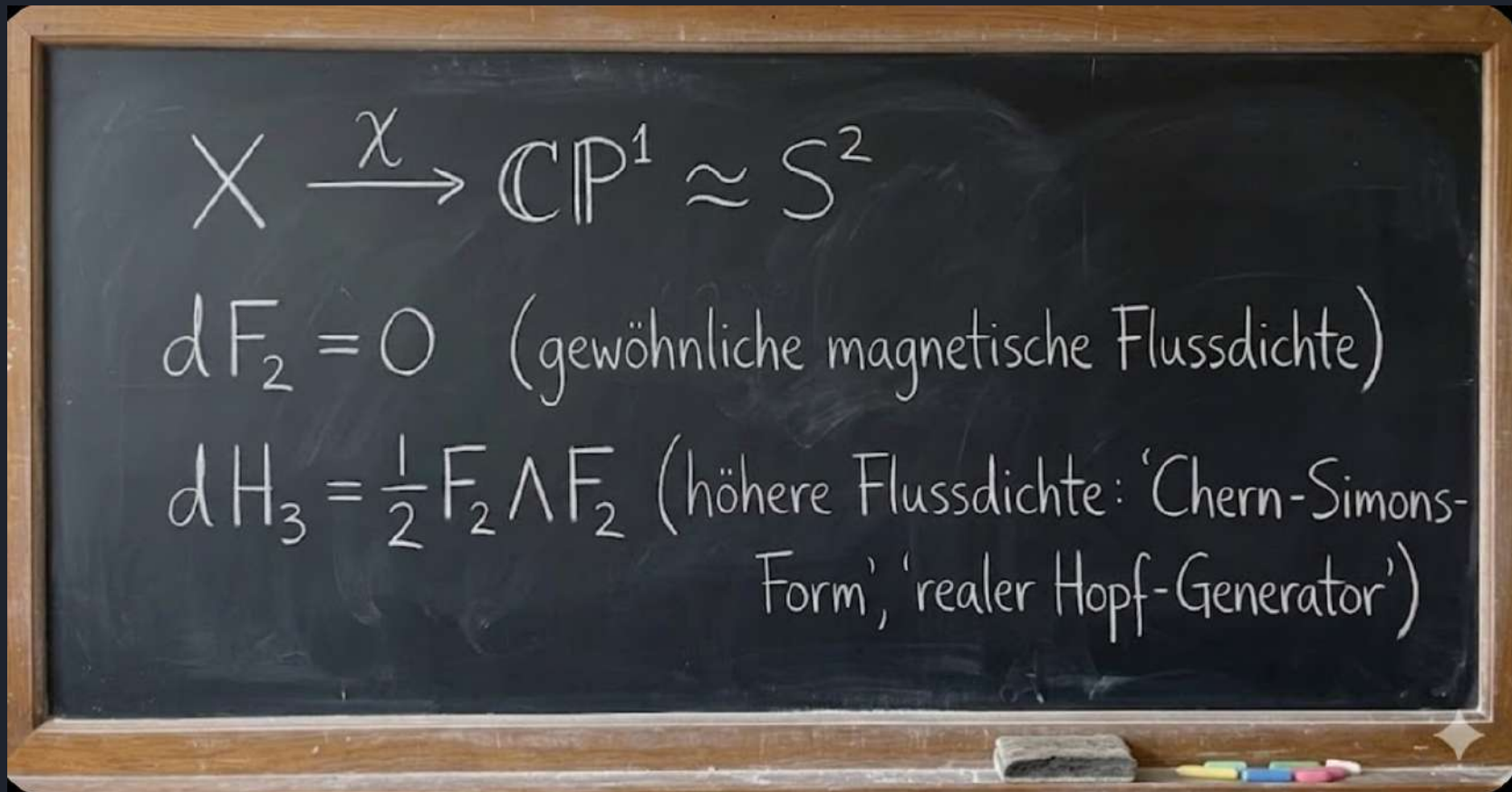
Also ist das deformierte Gauß-Gesetz, das wir gefunden hatten,

$$X \xrightarrow{\chi} \mathbb{C}P^1 \approx S^2$$

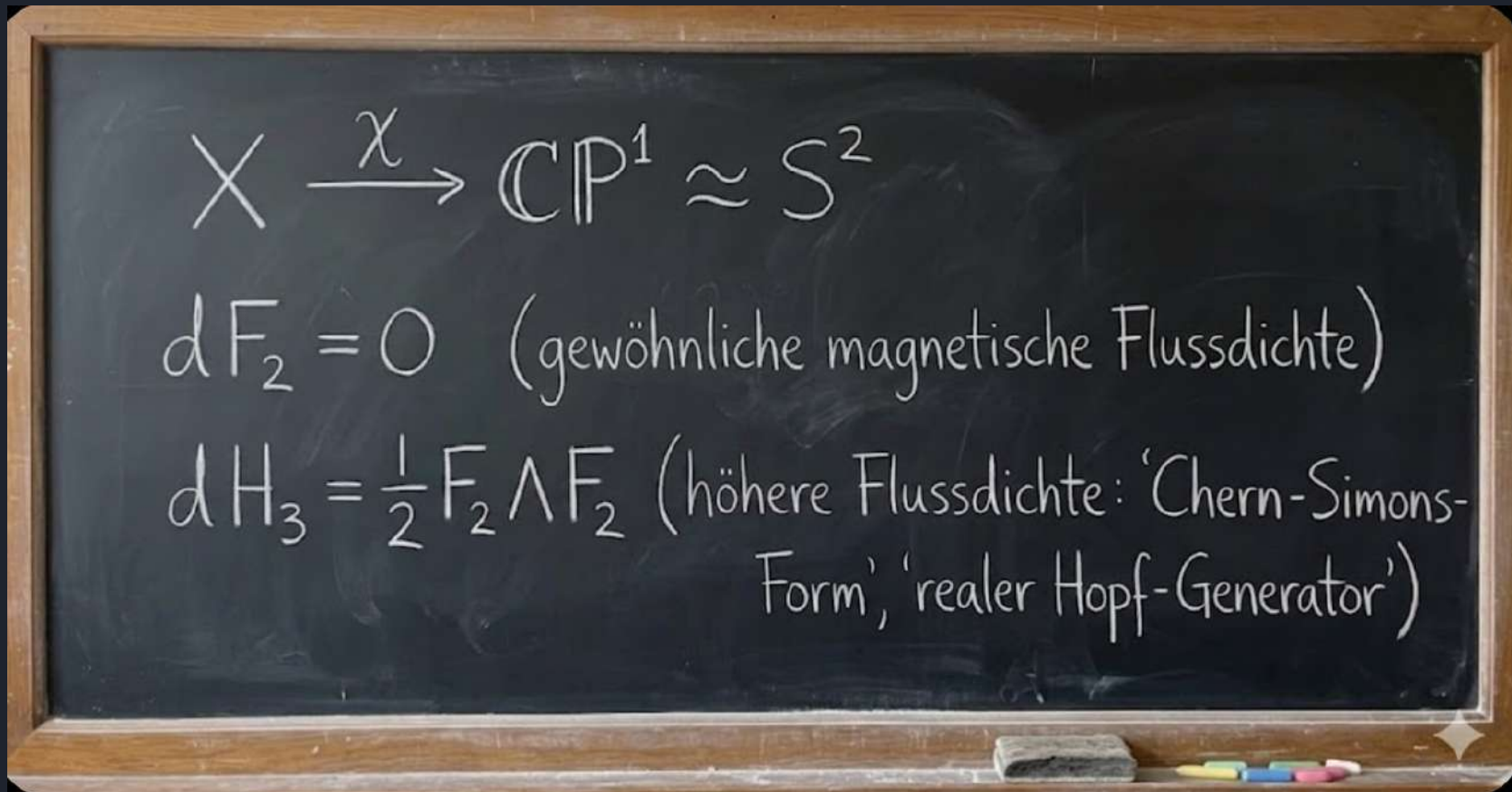
$$dF_2 = 0 \quad (\text{gewöhnliche magnetische Flussdichte})$$

$$dH_3 = \frac{1}{2} F_2 \wedge F_2 \quad (\text{höhere Flussdichte: 'Chern-Simons-Form', 'realer Hopf-Generator'})$$

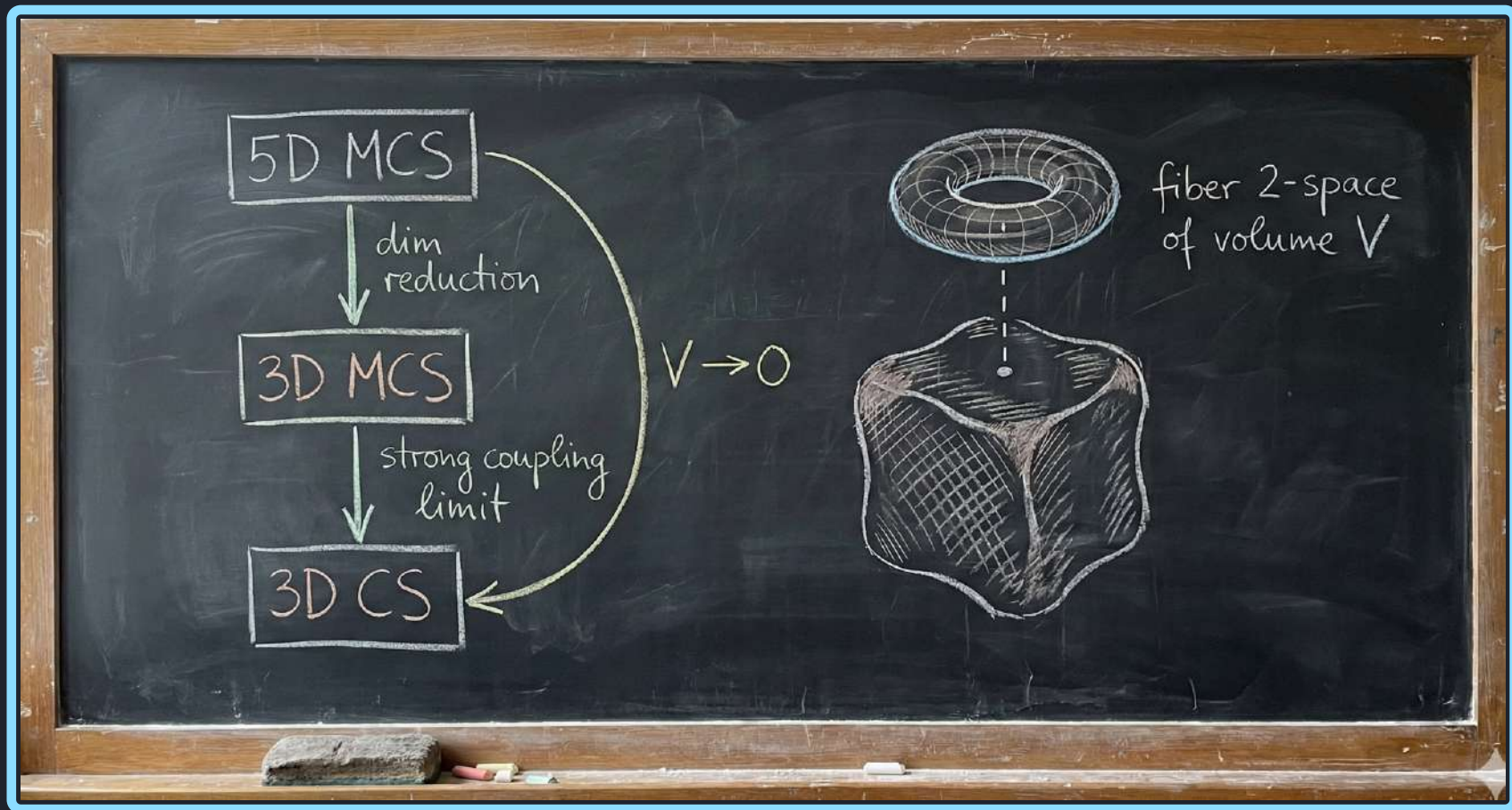
Also ist das deformierte Gauß-Gesetz, das wir gefunden hatten,



Also ist das deformierte Gauß-Gesetz, das wir gefunden hatten, das einer höherdim Feldtheorie mit höherdim Quellen (“Branen”),



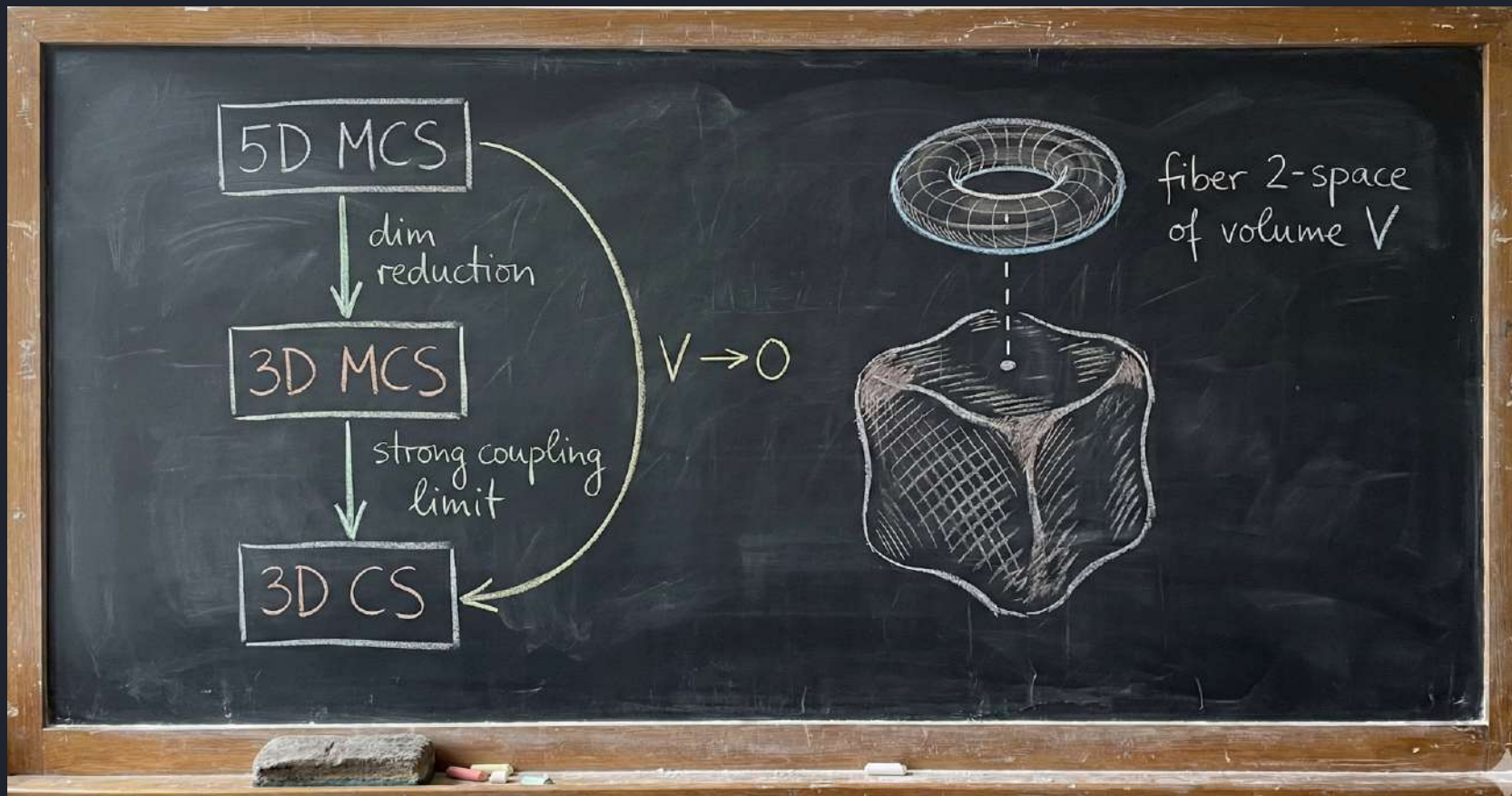
Also ist das deformierte Gauß-Gesetz, das wir gefunden hatten, das einer höherdim Feldtheorie mit höherdim Quellen ("Branen"), wie die bekannt als "5D Maxwell-Chern-Simons-Theorie" (MCS)



eine höherdim. Feldtheorie mit $\hbar \rightarrow 0$ herdim. Quellen ("Branen"), wie die bekannt als "5D Maxwell-Chern-Simons-Theorie" (MCS)

Renormalization of Chern–Simons Wilson loops via proper flux quantization in cohomotopy

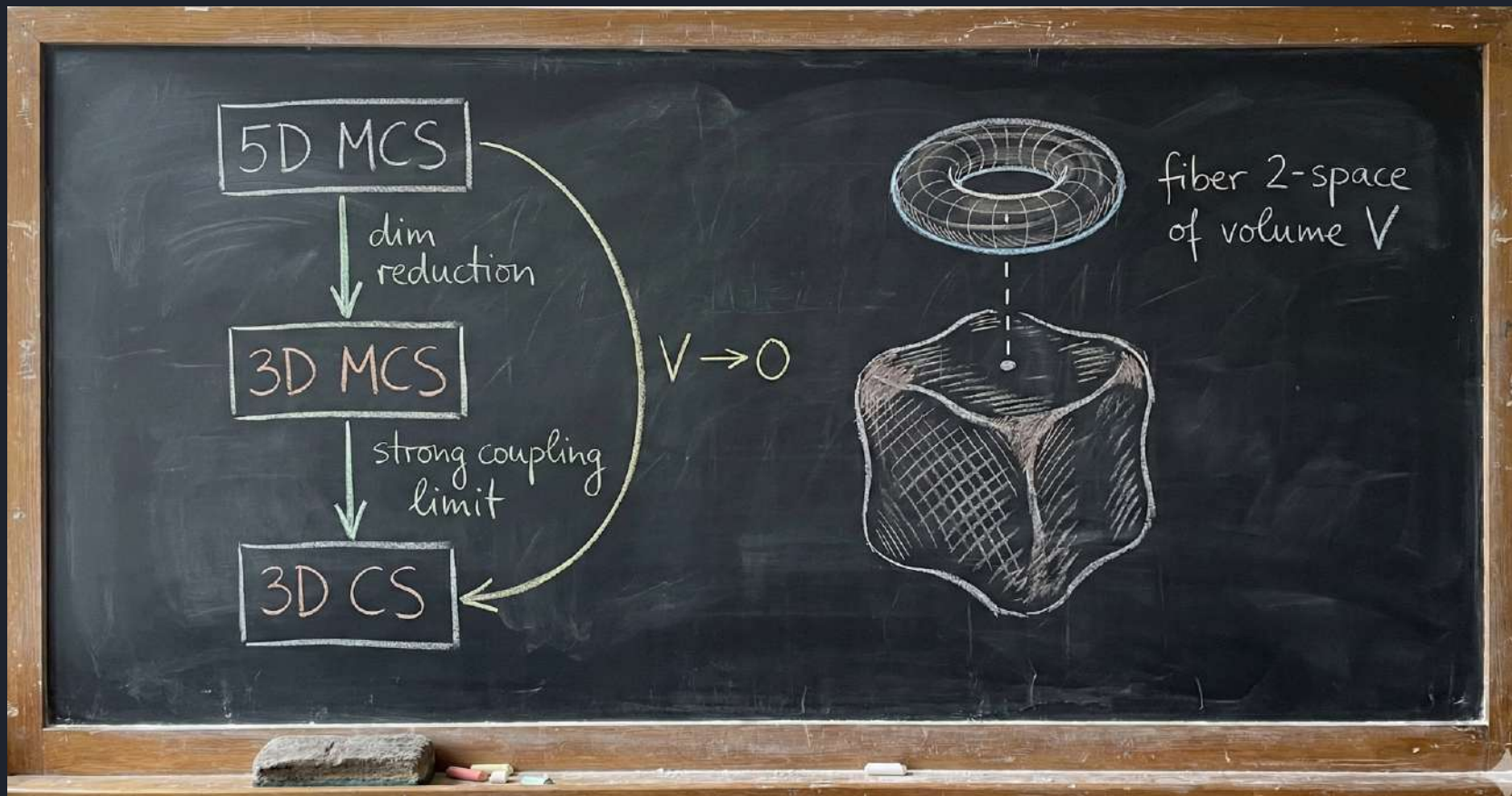
Hisham Sati and Urs Schreiber ✉



eine höherdim. Feldtheorie mit \hbar herdim. Quellen (“Branen”), wie die bekannt als “5D Maxwell-Chern-Simons-Theorie” (MCS)

Renormalization of Chern–Simons Wilson loops via proper flux quantization in cohomotopy

Hisham Sati and Urs Schreiber ✉



eine höherdim. Feldtheorie mit $\hbar \rightarrow 0$ herdim. Quellen (“Branen”), wie die bekannt als “5D Maxwell-Chern-Simons-Theorie” (MCS)

Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze

Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze

Höhere elektromagnetische Felder

höhere Flussdichten: $\vec{F} := \{F^{(i)} \in \Omega_{dR}^{\text{deg}_i}(X)\}_{i \in I}$

höhere Gaußsche Gesetze: $dF^{(i)} = P^i(\vec{F})$ (gradiertes Polynom)

Dualitätsbeziehungen: $\star F^{(i)} = \mu^i(\vec{F})$ " (invertierbar linear)

Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze

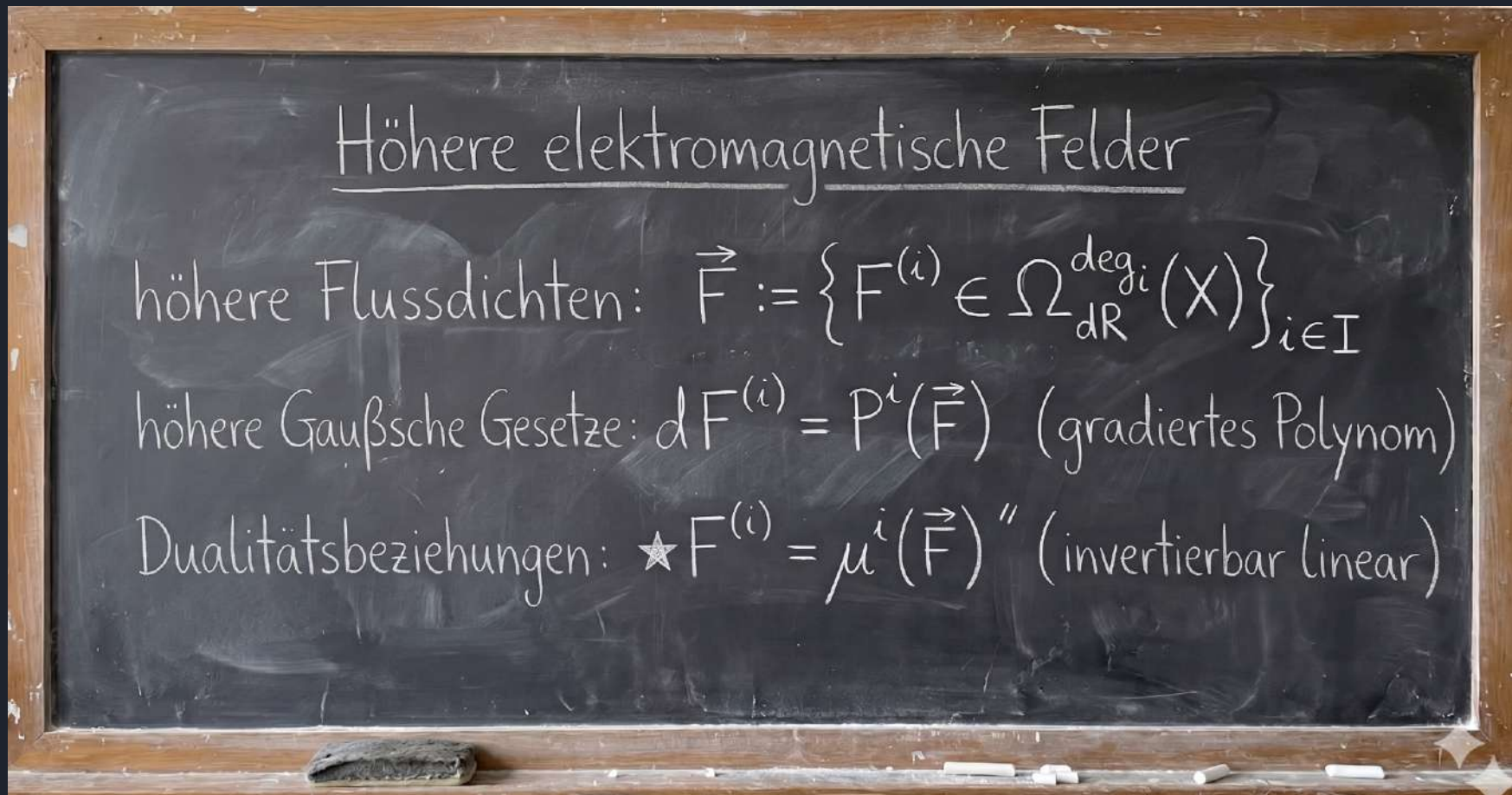
Beispiel: 11D Supergravitation ("M-Theorie")

höhere Flussdichten: G_4 und G_7

höhere Gaußsche Gesetze: $dG_4 = 0$, $dG_7 = \frac{1}{2} G_4 \wedge G_4$

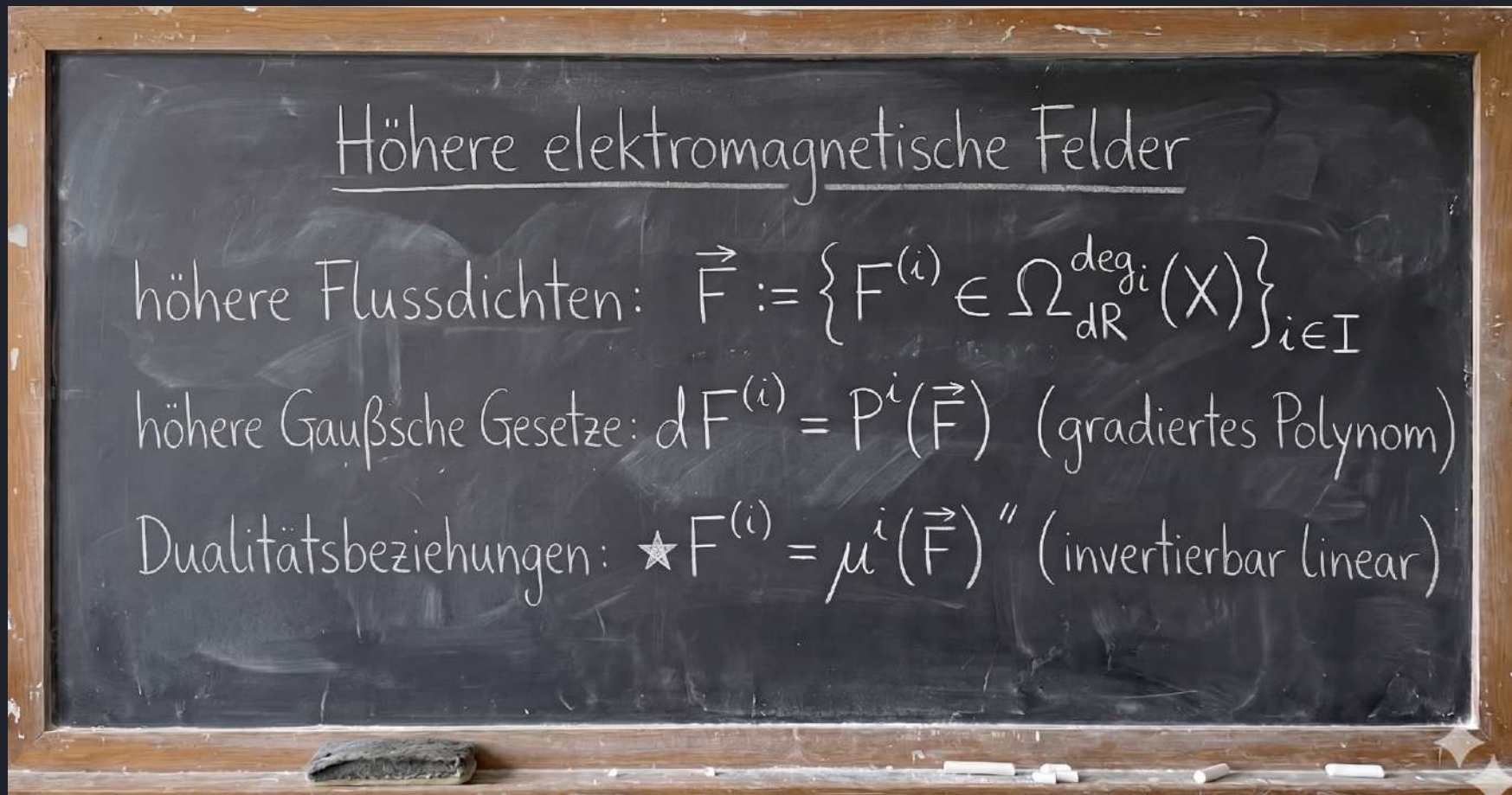
Dualitätsbeziehungen: $\star G_4 = G_7$

Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze



Solche Gaußgesetze sind charakterisiert durch geschlossene Differentialformen
mit Koeffizienten in einer *Homotopie-Lie-Algebra* \mathfrak{a} .

Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze



Solche Gaußgesetze sind charakterisiert durch geschlossene Differentialformen
mit Koeffizienten in einer *Homotopie-Lie-Algebra* **(a)**.

Kürzel für höhere Gaußgesetze

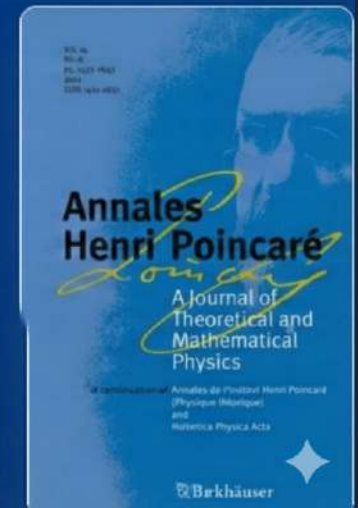
Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze

[Home](#) > [Annales Henri Poincaré](#) > Article

Flux Quantization on Phase Space

[H. Sati](#) and [U. Schreiber](#)

Volume 26, pages 895–919, (2025)



Solche Gaußgesetze sind charakterisiert durch geschlossene Differentialformen
mit Koeffizienten in einer *Homotopie-Lie-Algebra* \mathfrak{a} .
Kürzel für höhere Gaußgesetze

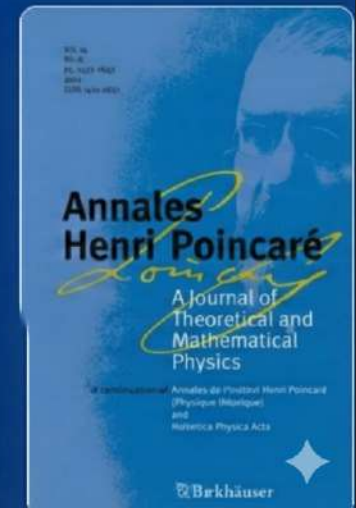
Allgemein: Höhere Flussdichten in höheren Dimensionen
haben (gradiert) polynomiale Gaußgesetze

[Home](#) > [Annales Henri Poincaré](#) > Article

Flux Quantization on Phase Space

[H. Sati](#) and [U. Schreiber](#)

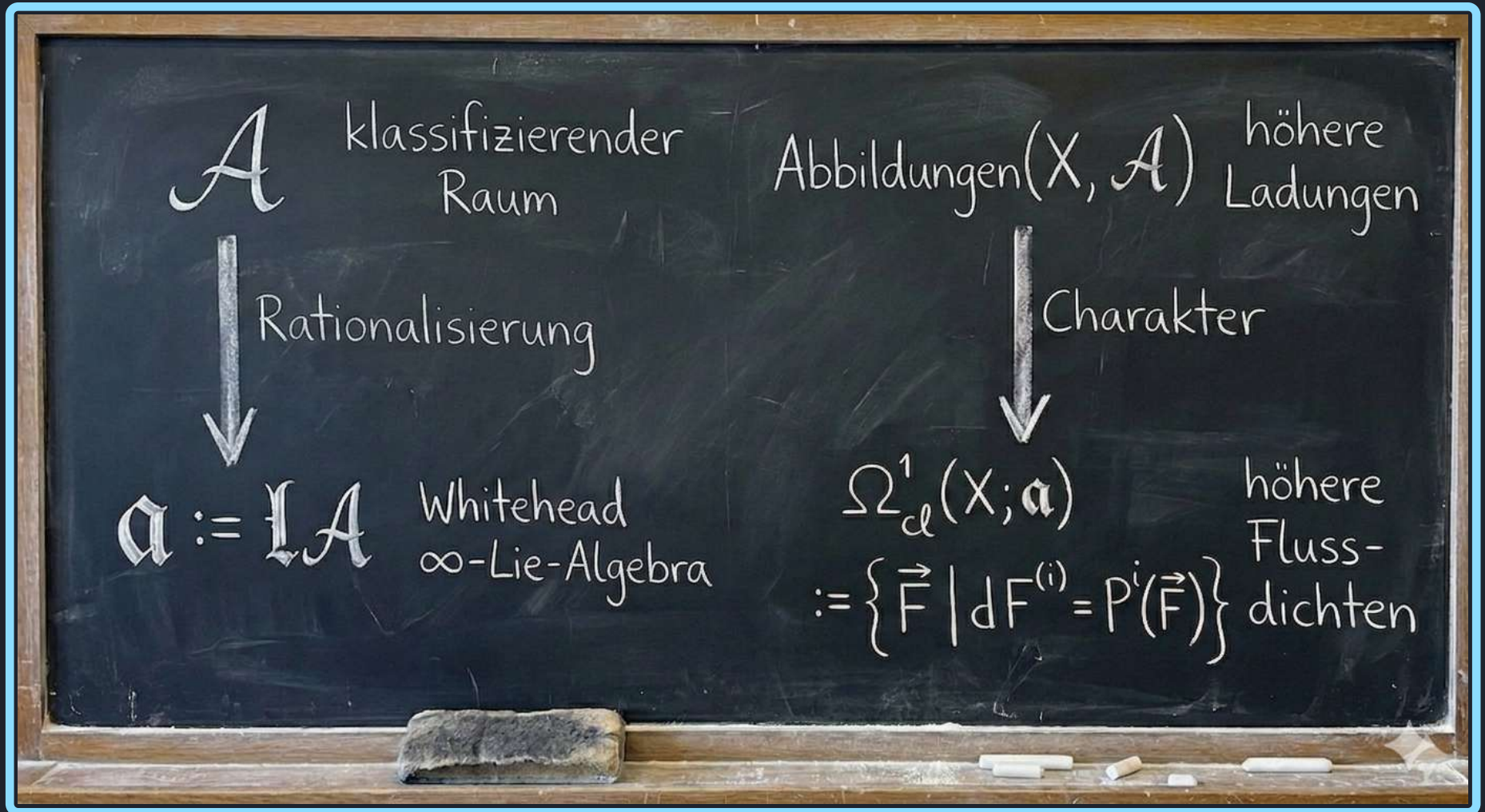
Volume 26, pages 895–919, (2025)



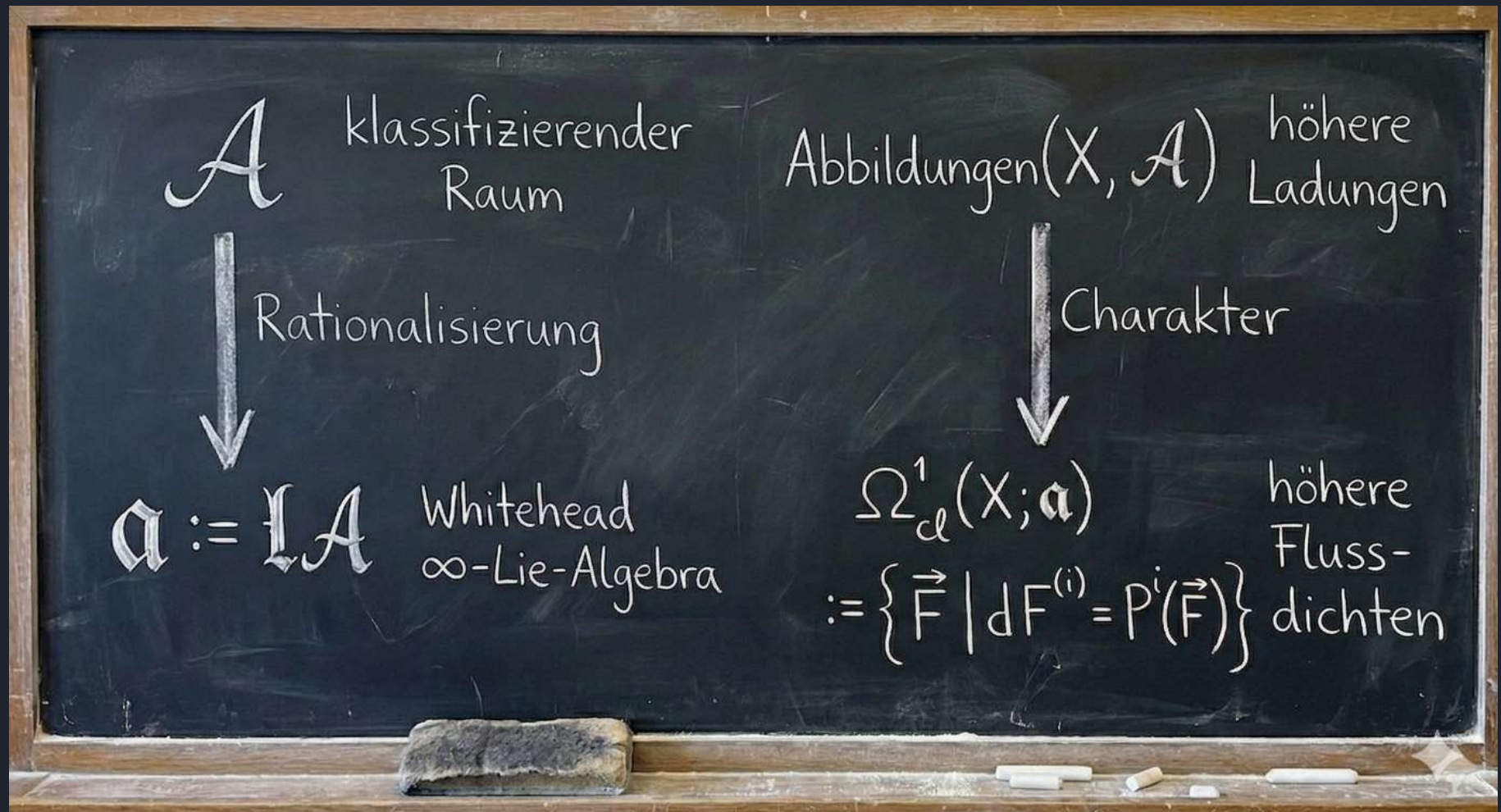
Solche Gaußgesetze sind charakterisiert durch geschlossene Differentialformen
mit Koeffizienten in einer *Homotopie-Lie-Algebra* \mathfrak{a} .
Kürzel für höhere Gaußgesetze

Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche
höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:

Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:

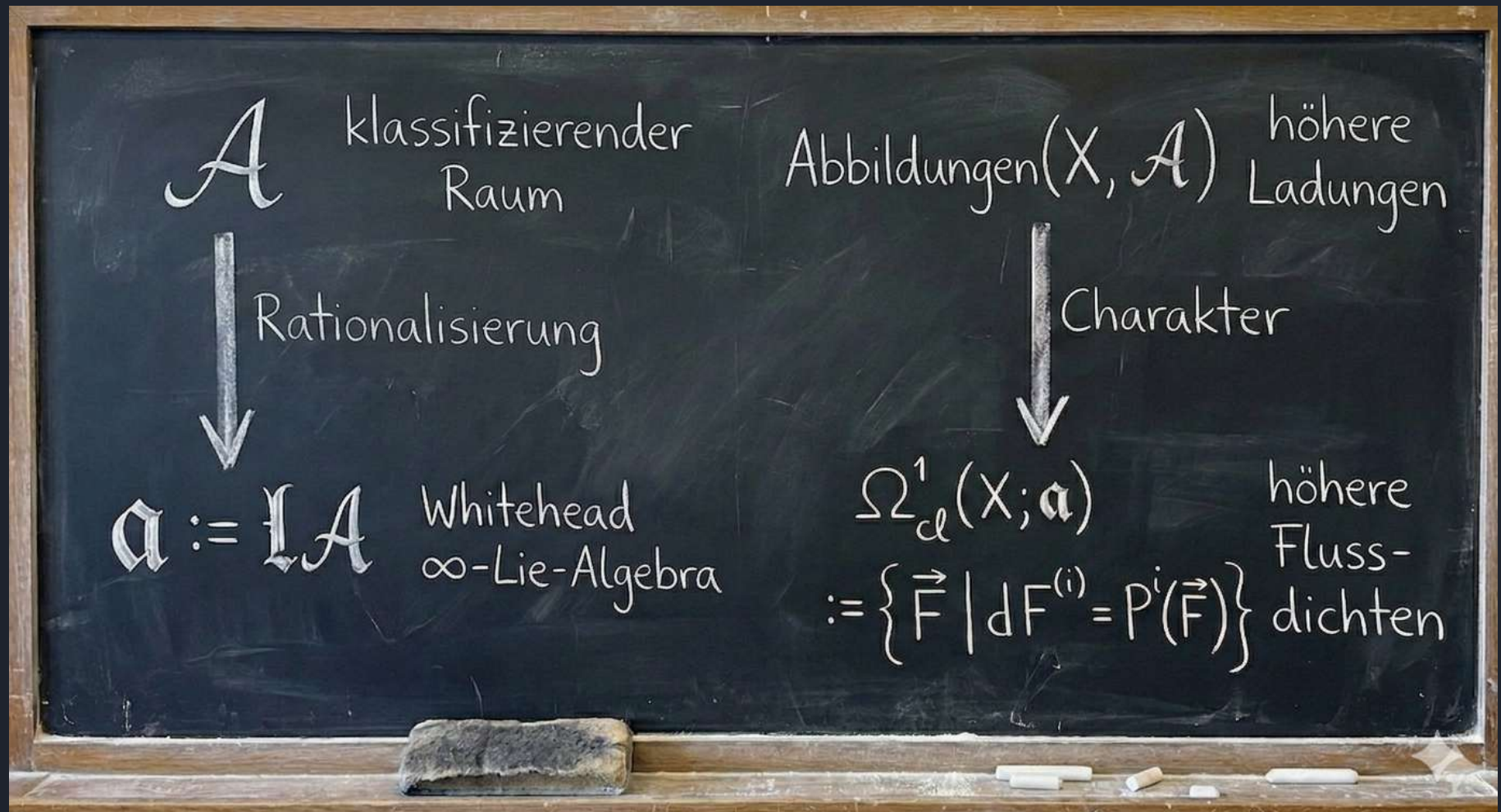


Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:



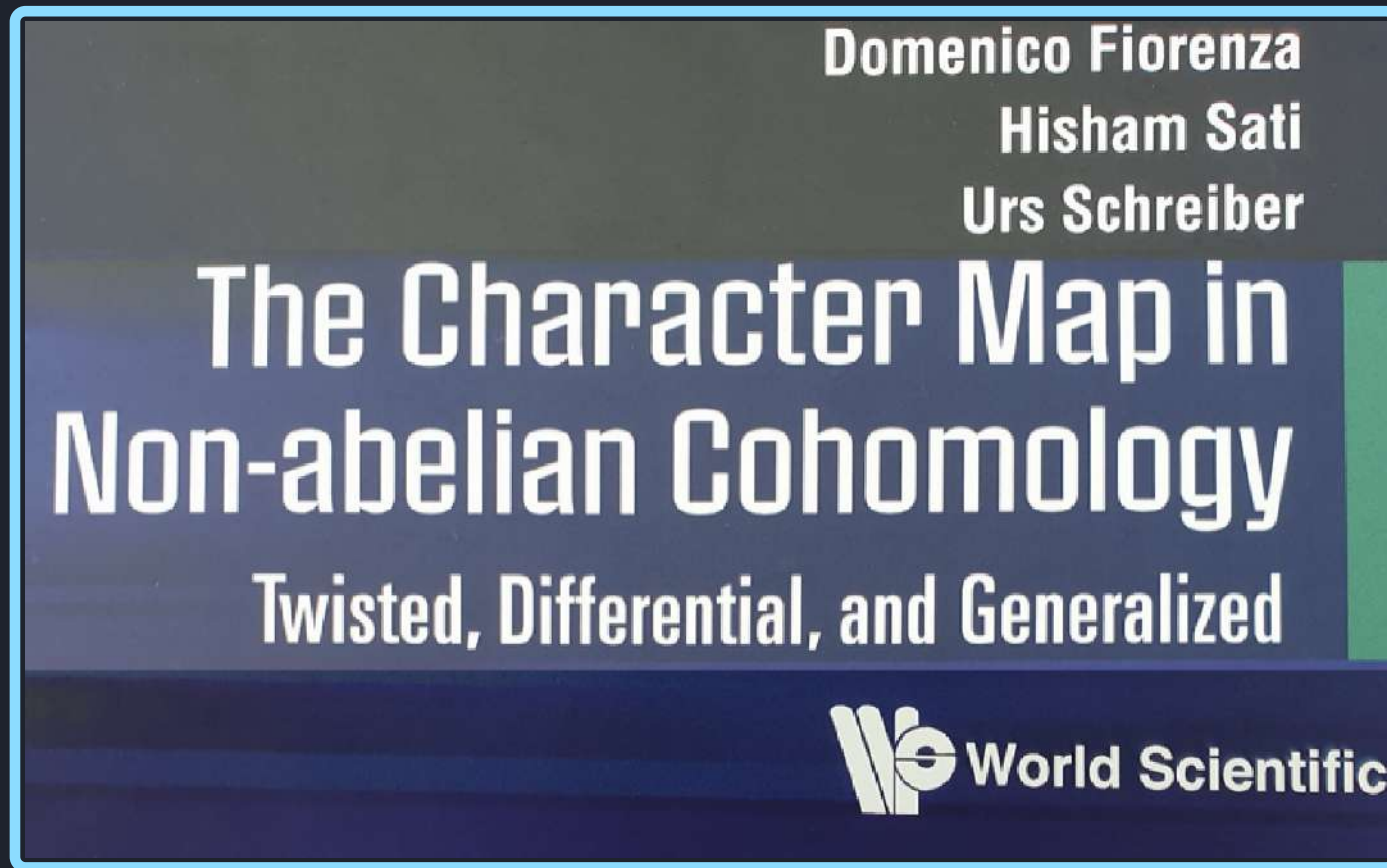
Daher ist die globale Vervollständigung von höheren Feldern durch Flussquantisierung die Wahl von \mathcal{A} so dass $\mathcal{L}\mathcal{A} \simeq \mathfrak{a}$

Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:



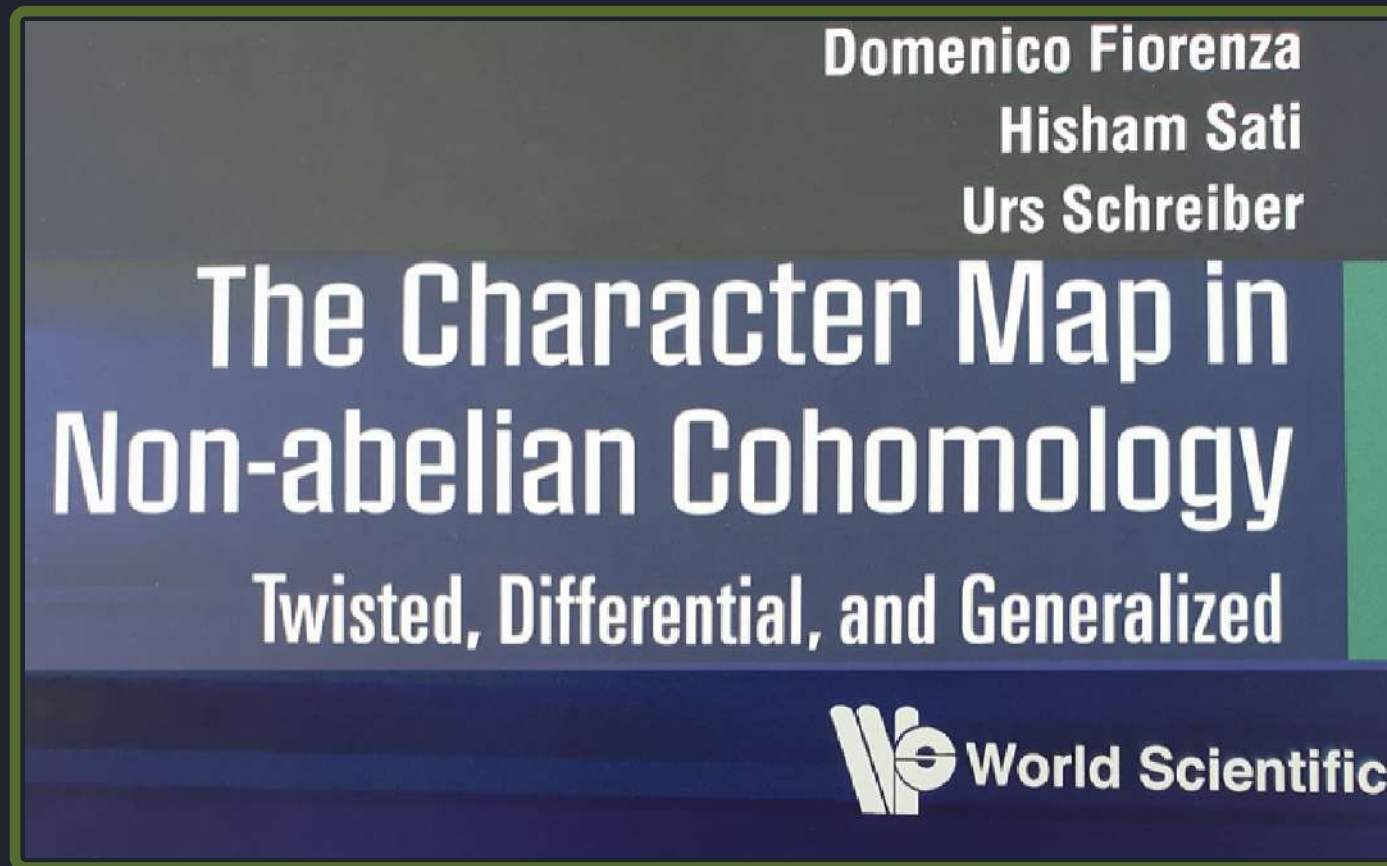
Daher ist die globale Vervollständigung von höheren Feldern durch Flussquantisierung die Wahl von \mathcal{A} so dass $\mathcal{L}\mathcal{A} \simeq \mathfrak{a}$

Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:



Daher ist die globale Vervollständigung von höheren Feldern durch Flussquantisierung die Wahl von \mathcal{A} so dass $\mathfrak{L}\mathcal{A} \simeq \mathfrak{a}$

Eine *Charakter-Abbildung* assoziiert solche höheren Gaußgesetze zu klassifizierenden Räumen:



Daher ist die globale Vervollständigung von höheren Feldern durch Flussquantisierung die Wahl von \mathcal{A} so dass $\mathfrak{L}\mathcal{A} \simeq \mathfrak{a}$

Fazit soweit bzgl. FQH

Zusammenfassung

effektive FQH-Felder



als Dim-Reduktion von

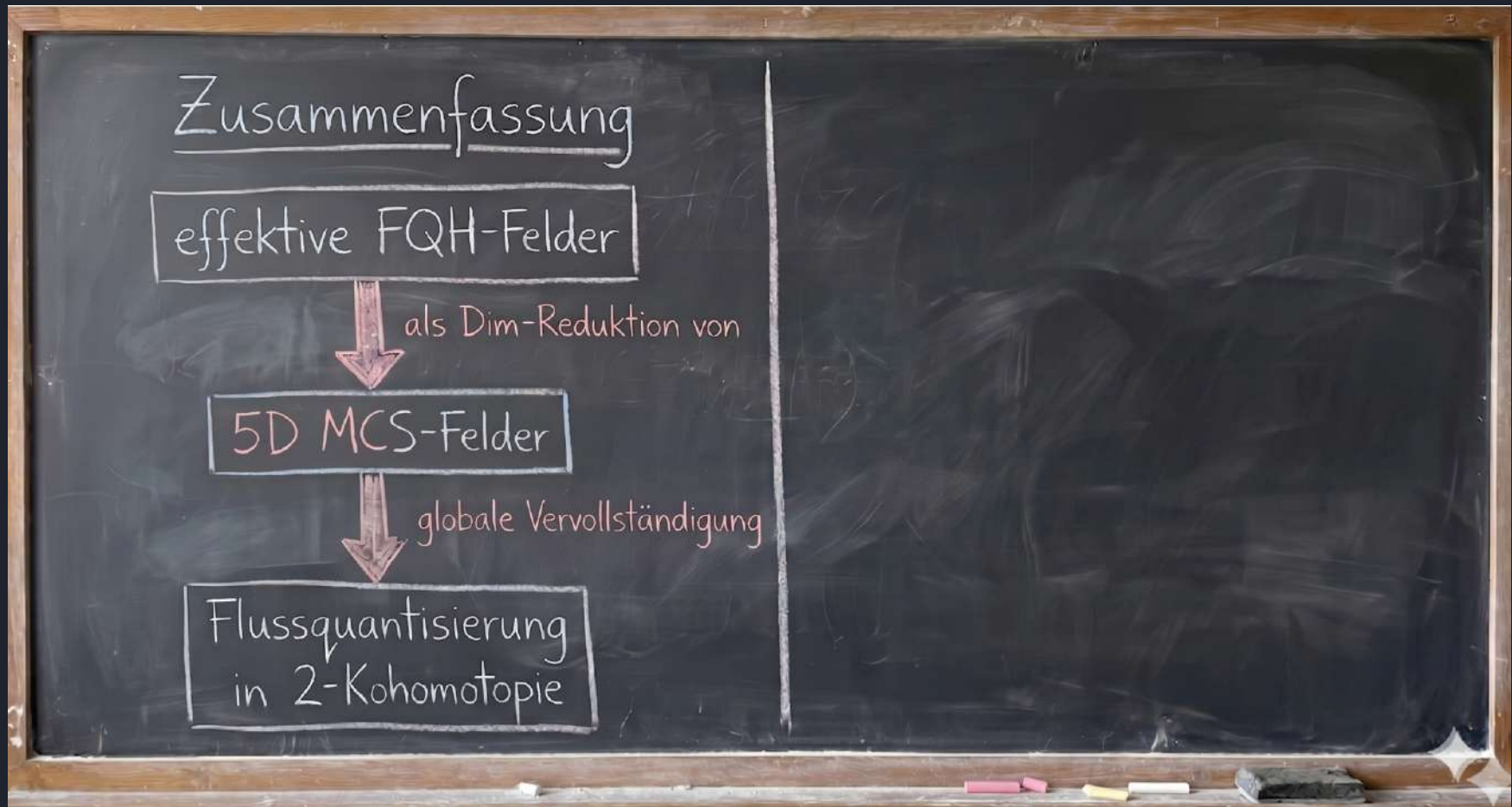
5D MCS-Felder



globale Vervollständigung

Flussquantisierung
in 2-Kohomotopie

Fazit soweit bzgl. FQH und
Ausblick auf das Millennium Problem:



Fazit soweit bzgl. FQH und
Ausblick auf das Millennium Problem:

Zusammenfassung

effektive FQH-Felder

als Dim-Reduktion von

5D MCS-Felder

globale Vervollständigung

Flussquantisierung
in 2-Kohomotopie

Spekulativer Ausblick

Hadrodynamik

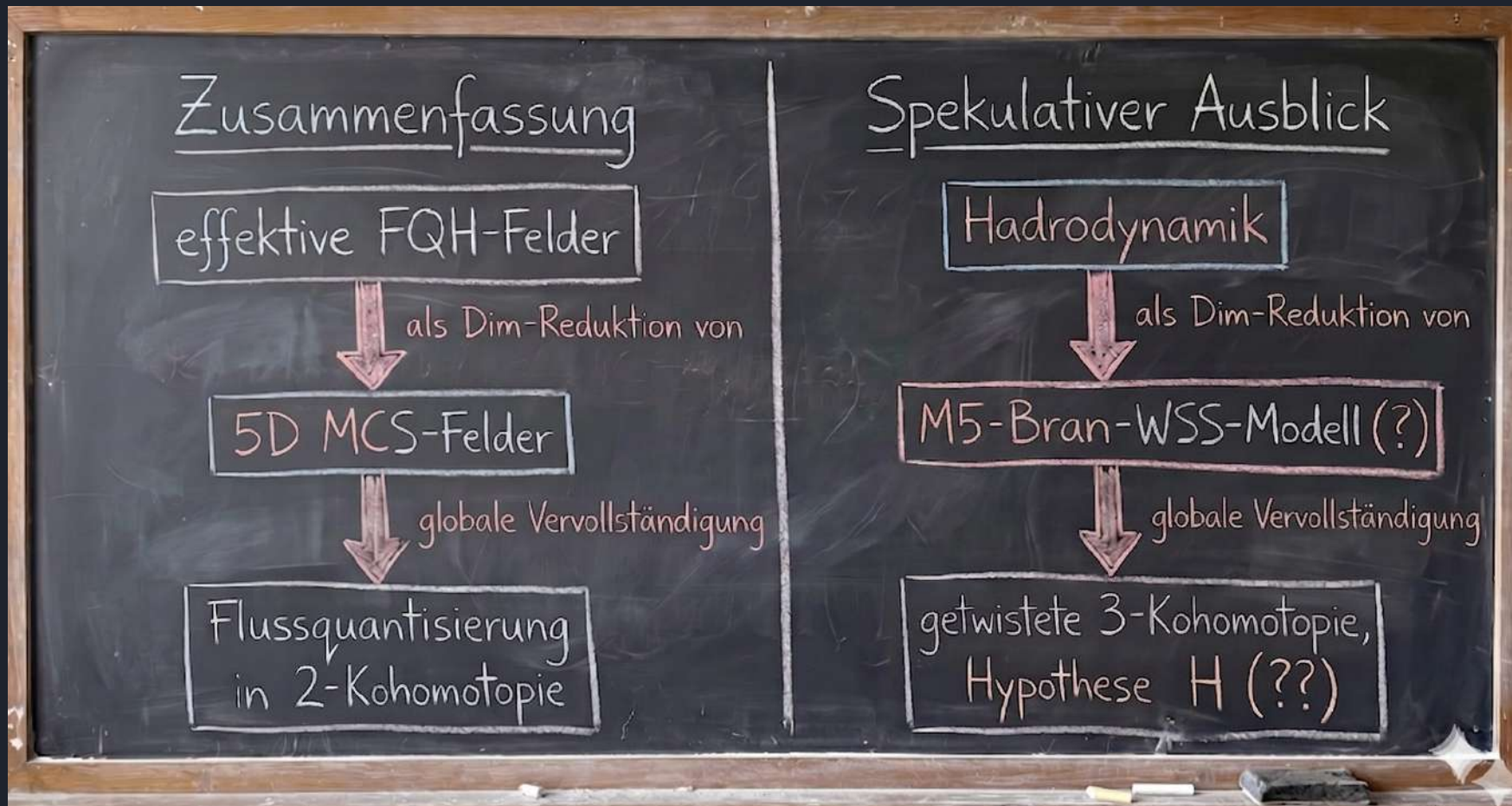
als Dim-Reduktion von

M5-Bran-WSS-Modell (?)

globale Vervollständigung

getwistete 3-Kohomotopie,
Hypothese H (??)

Fazit soweit bzgl. FQH und Ausblick auf das Millennium Problem:

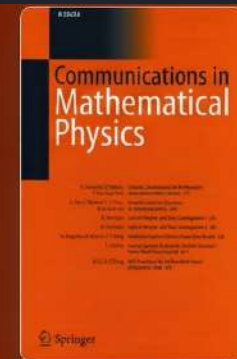


[Home](#) > [Communications in Mathematical Physics](#) > [Article](#)

Twisted Cohomotopy Implies M-Theory Anomaly Cancellation on 8-Manifolds

D. Fiorenza, H. Sati and U. Schreiber

Volume 377, pages 1961–2025, (2020) [Cite this article](#)



Fazit soweit bzgl. FQH und
Ausblick auf das Millennium Problem:

Zusammenfassung

effektive FQH-Felder

als Dim-Reduktion von

5D MCS-Felder

globale Vervollständigung

Flussquantisierung
in 2-Kohomotopie

Spekulativer Ausblick

Hadrodynamik

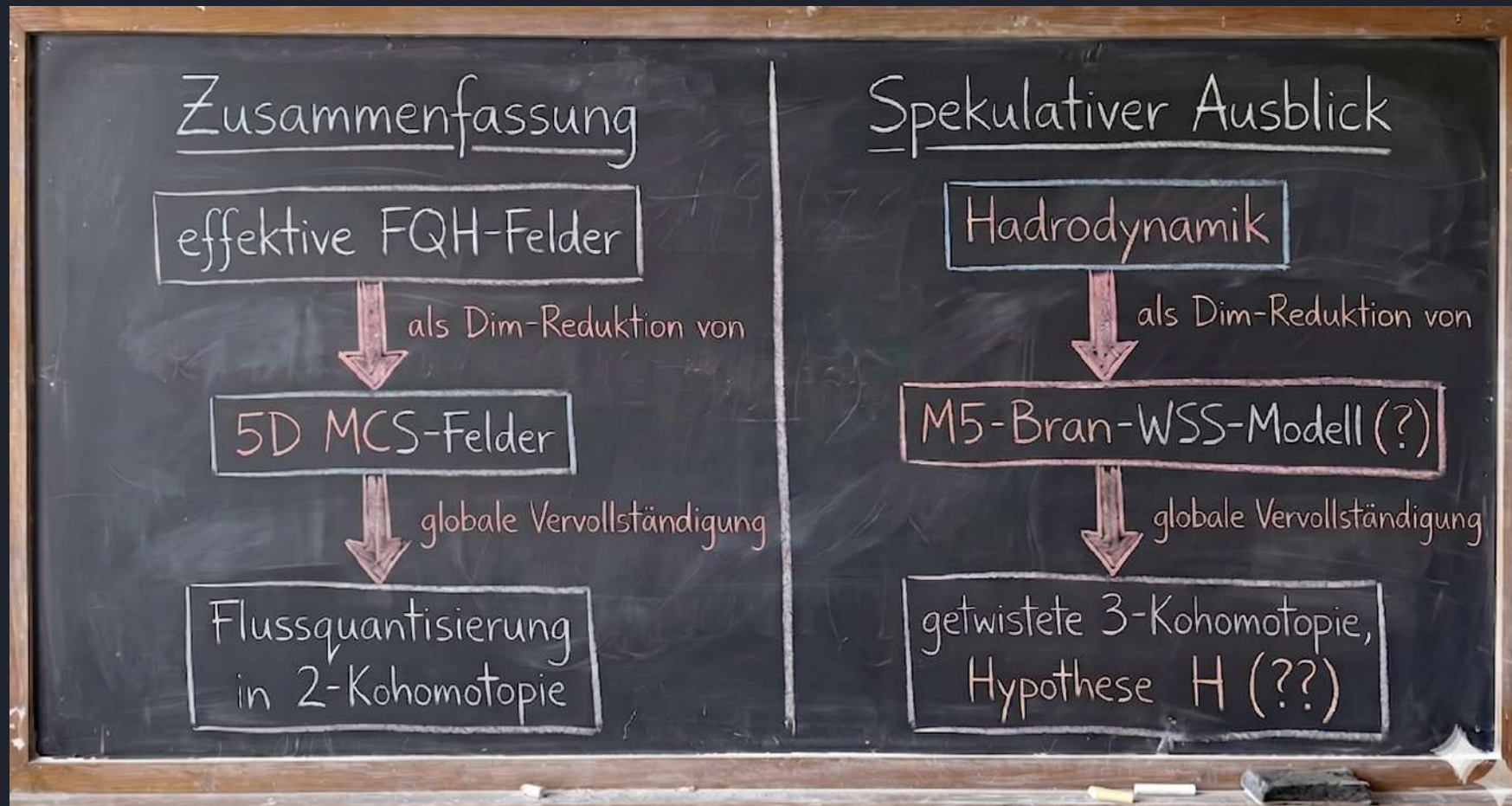
als Dim-Reduktion von

M5-Bran-WSS-Modell (?)

globale Vervollständigung

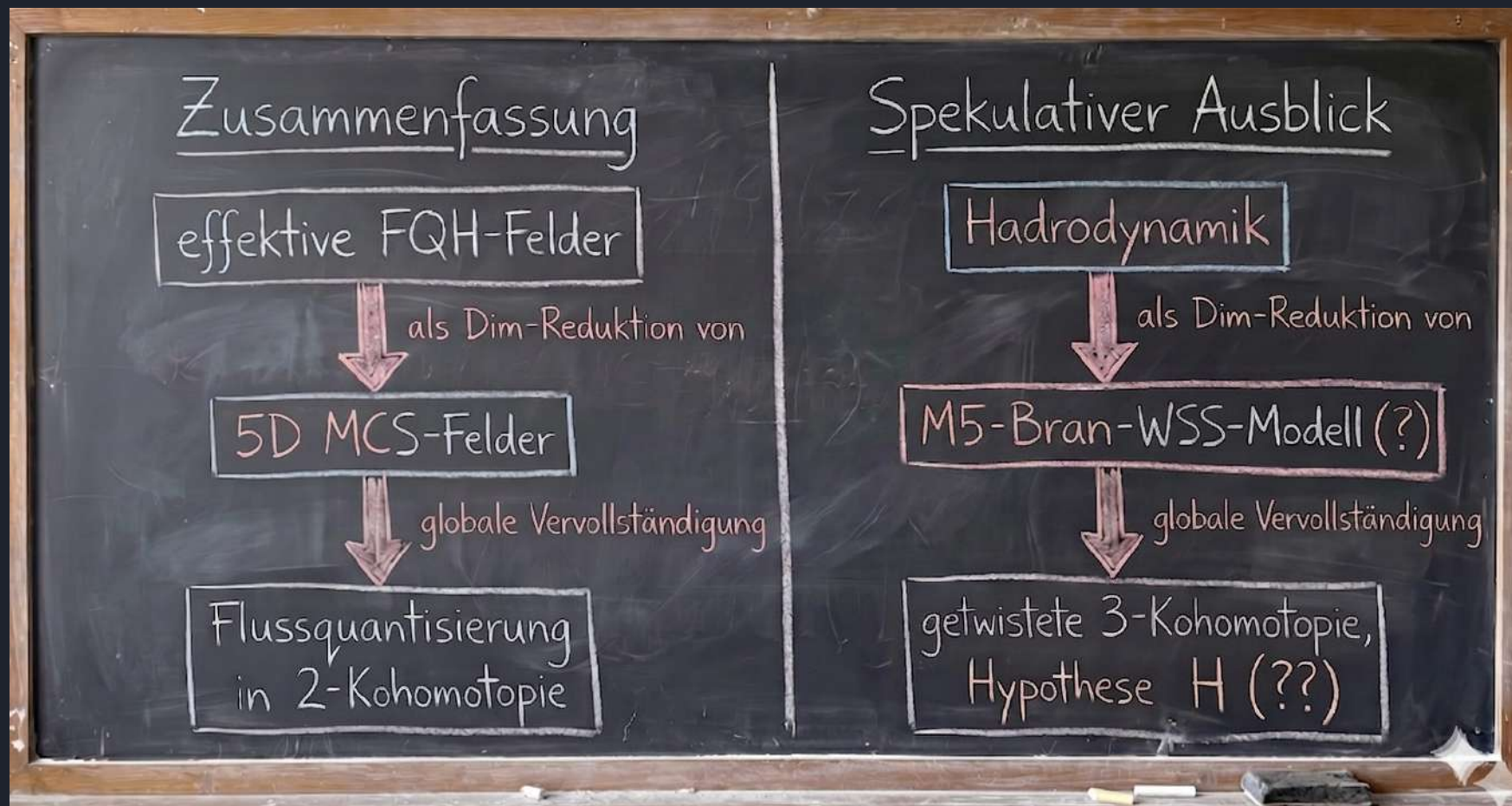
getwistete 3-Kohomotopie,
Hypothese H (??)

Fazit soweit bzgl. FQH und
Ausblick auf das Millennium Problem:



Nun ein näherer Blick auf den mathematischen Rahmen.

Fazit soweit bzgl. FQH und
Ausblick auf das Millennium Problem:



Nun ein näherer Blick auf den mathematischen Rahmen.

Nichtperturbativer Phasenraum

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,

$$\begin{array}{c} \text{Fluss-} \\ \text{dichten } \vec{F} \\ \downarrow \\ \Omega_{\text{cl}}^1(X; \mathfrak{a}) \end{array}$$

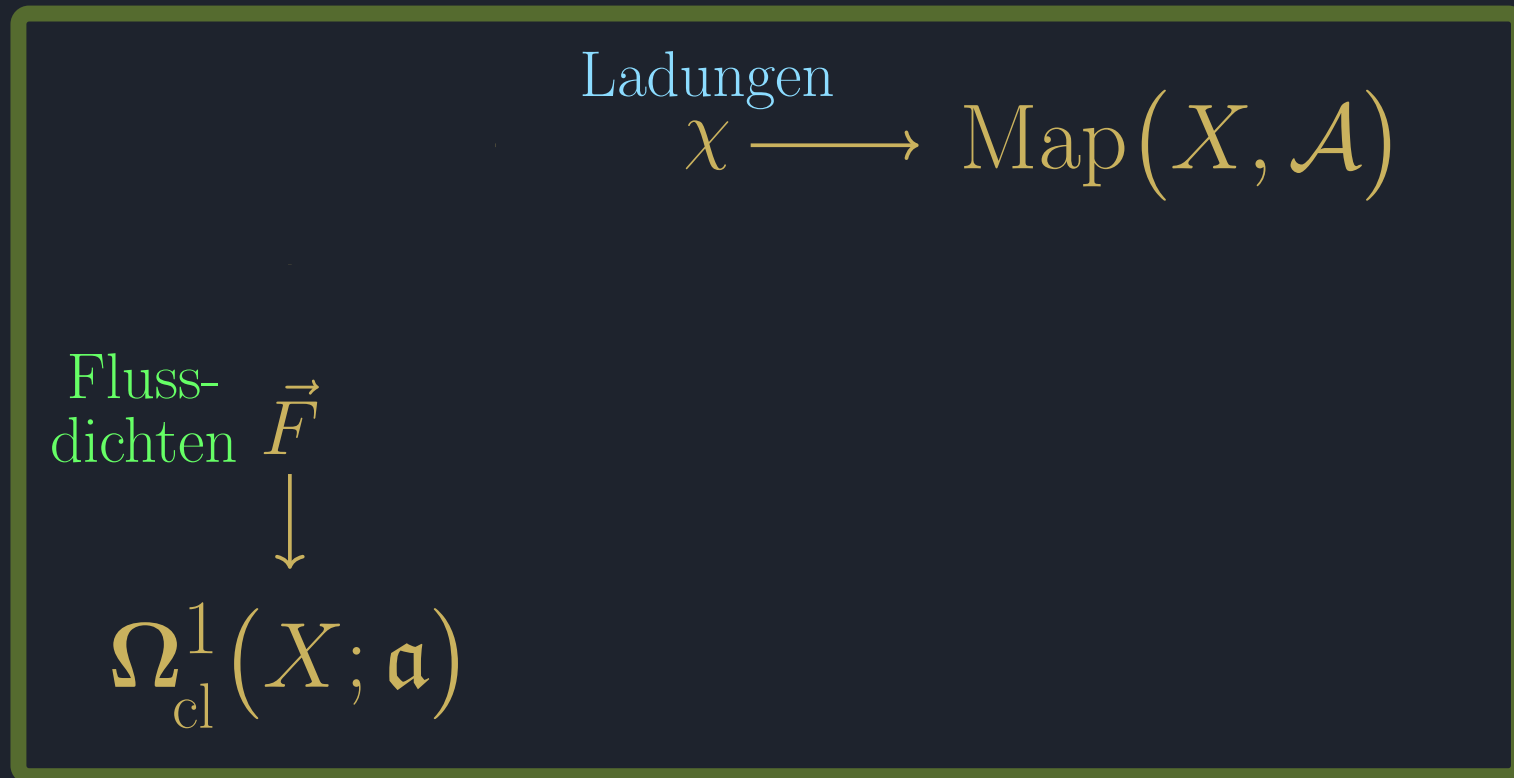
Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

$$\begin{array}{c} \text{Fluss-} \\ \text{dichten } \vec{F} \\ \downarrow \\ \Omega_{\text{cl}}^1(X; \mathfrak{a}) \end{array}$$

Nichtperturbativer Phasenraum

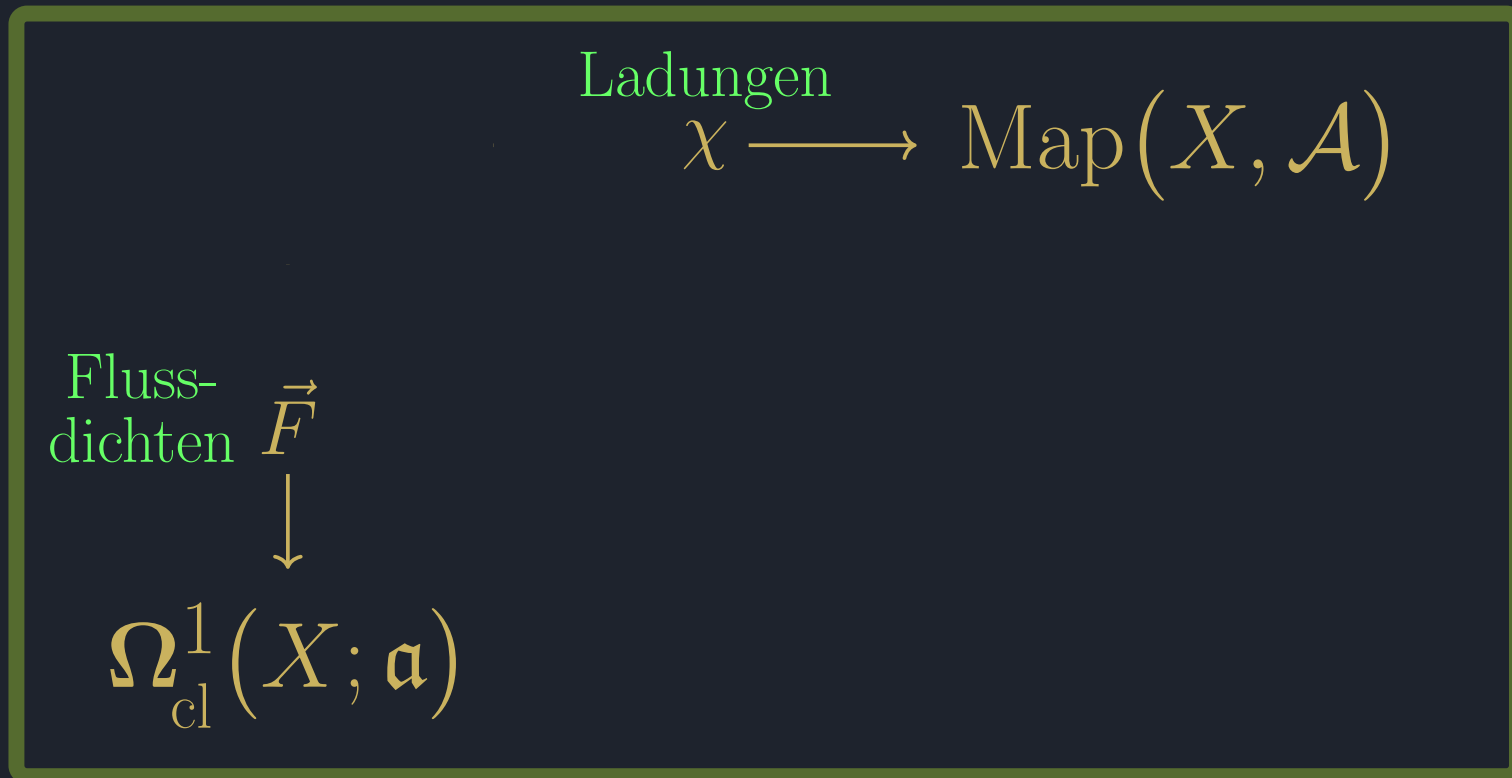
Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .



Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

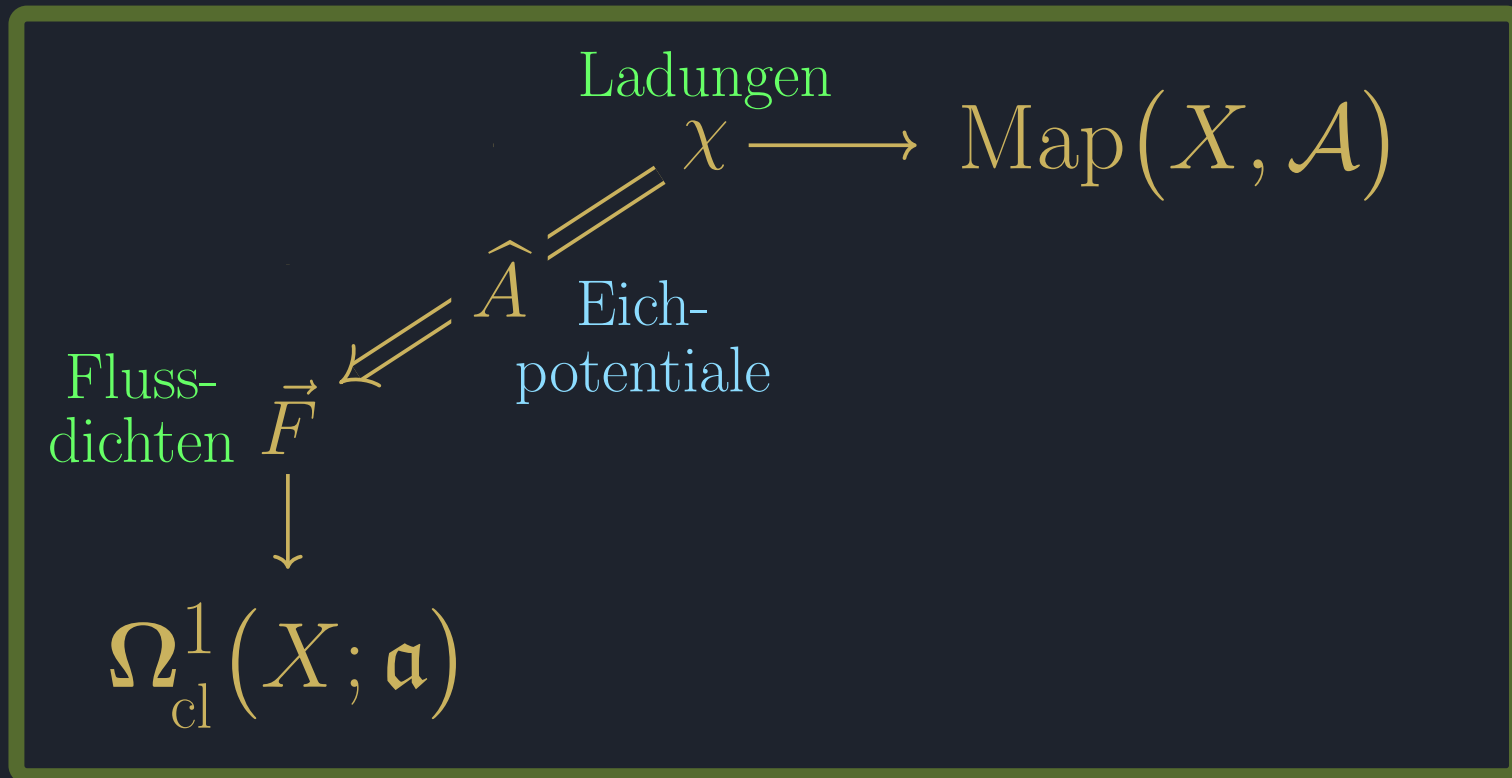
Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.



Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

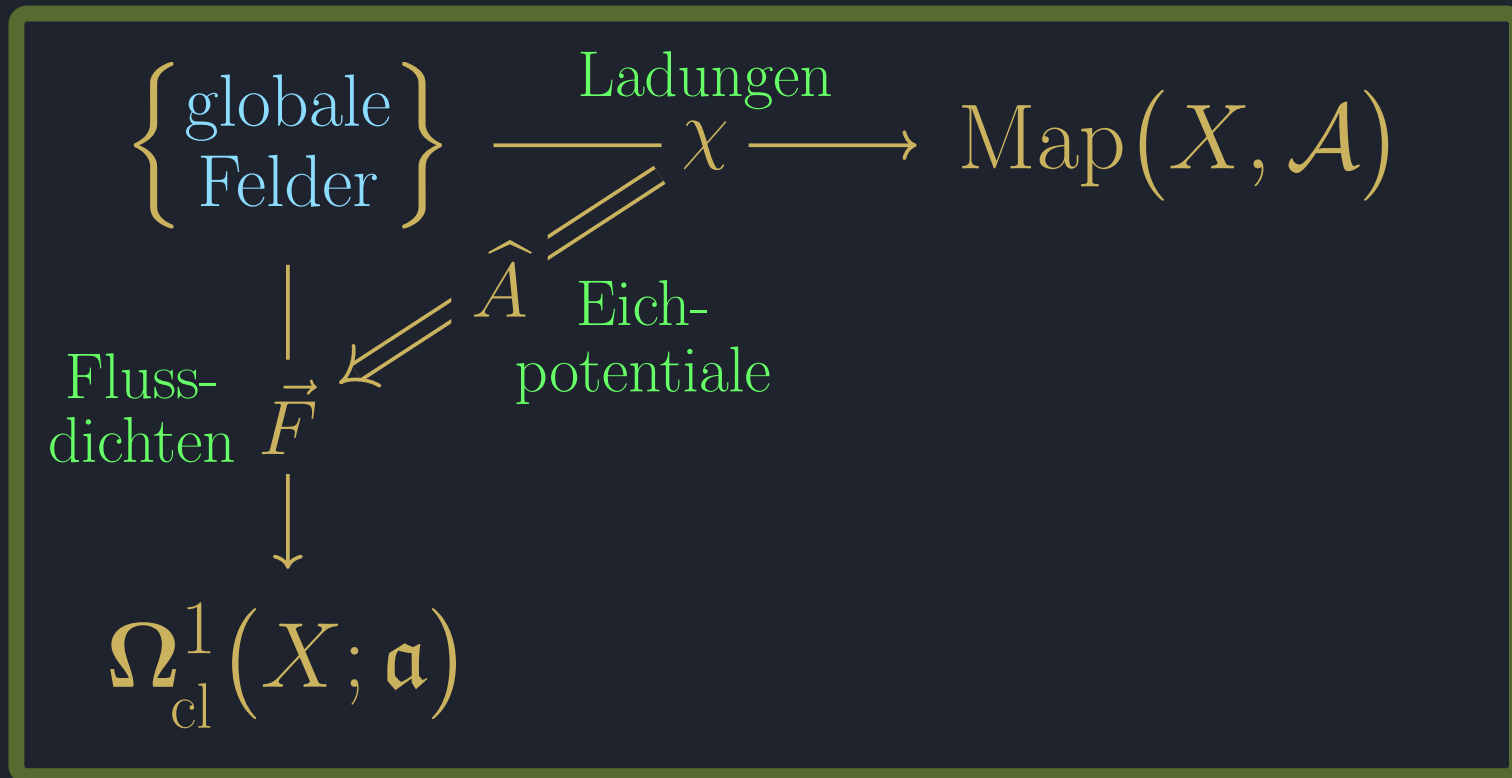
Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.



Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

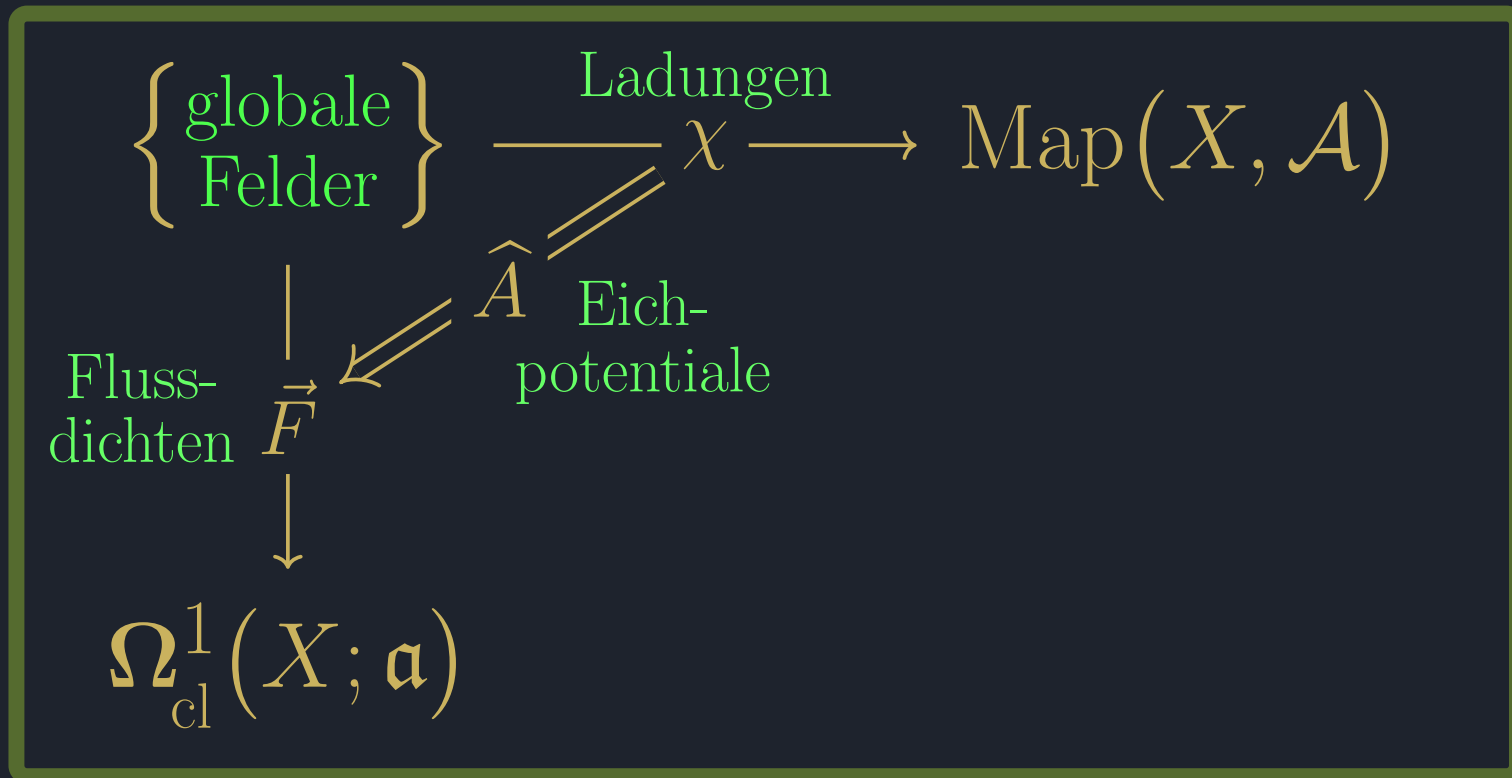
Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.



Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.

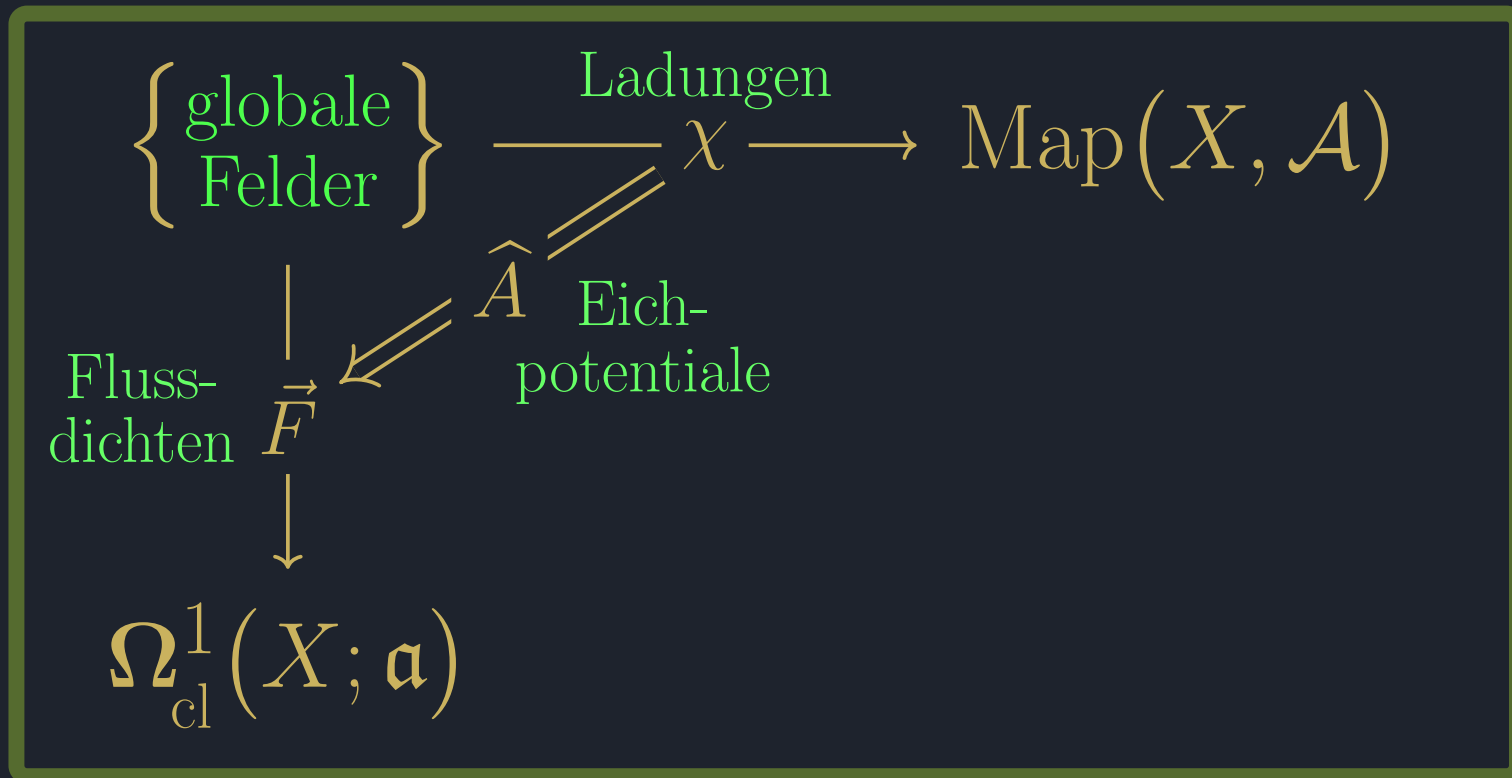


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.

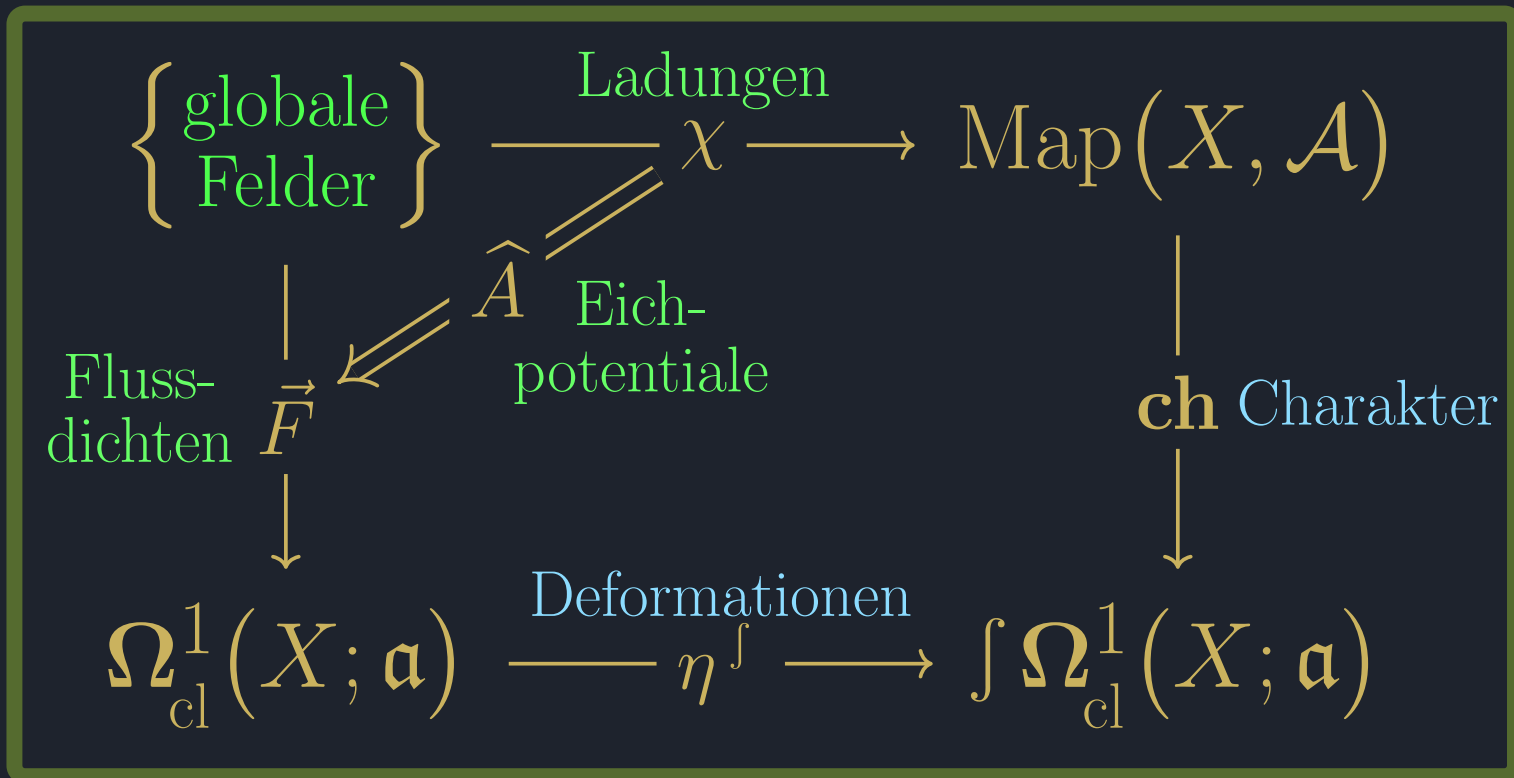


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:
Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt*

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
 lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
 global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.

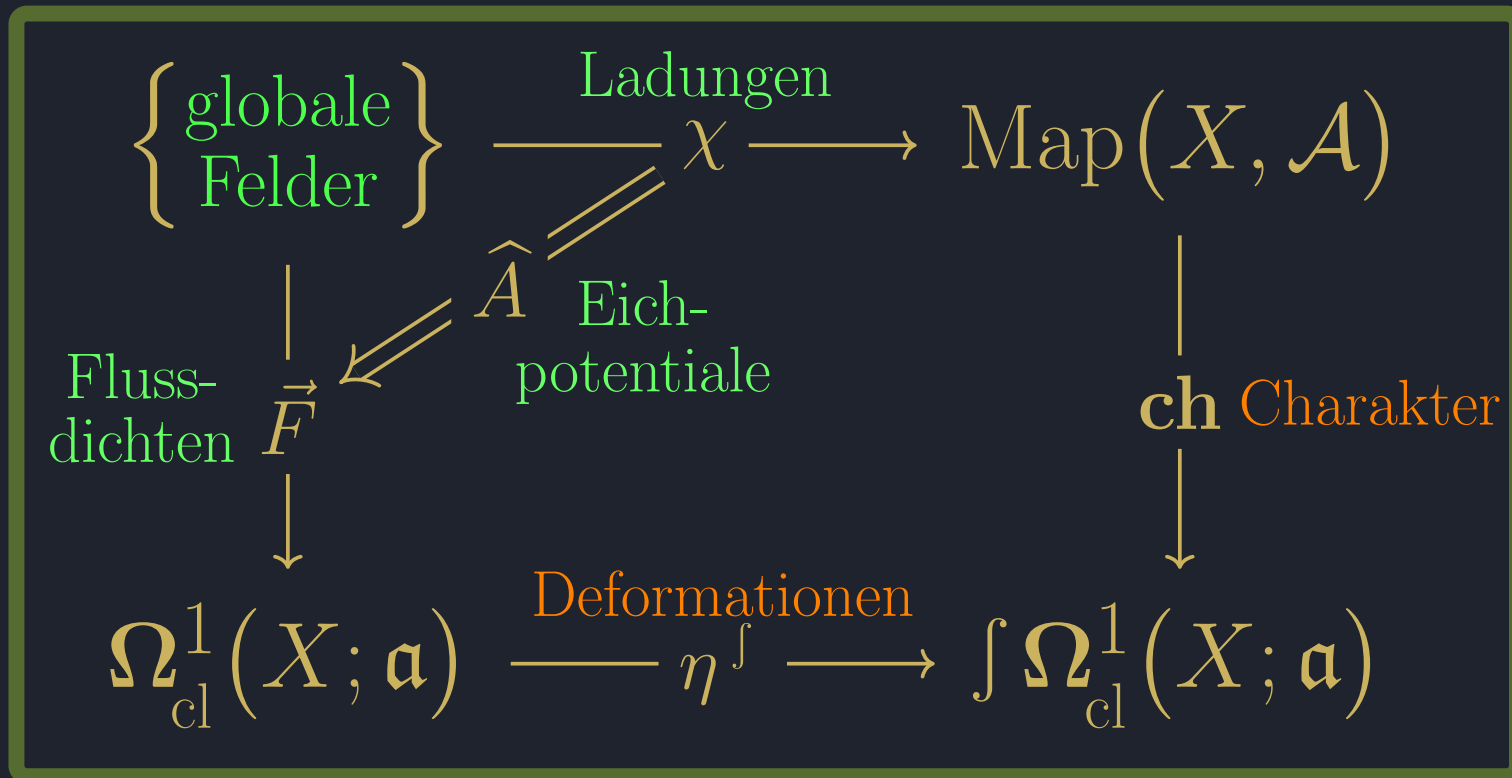


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:
 Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt*

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind:
 lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen,
 global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.

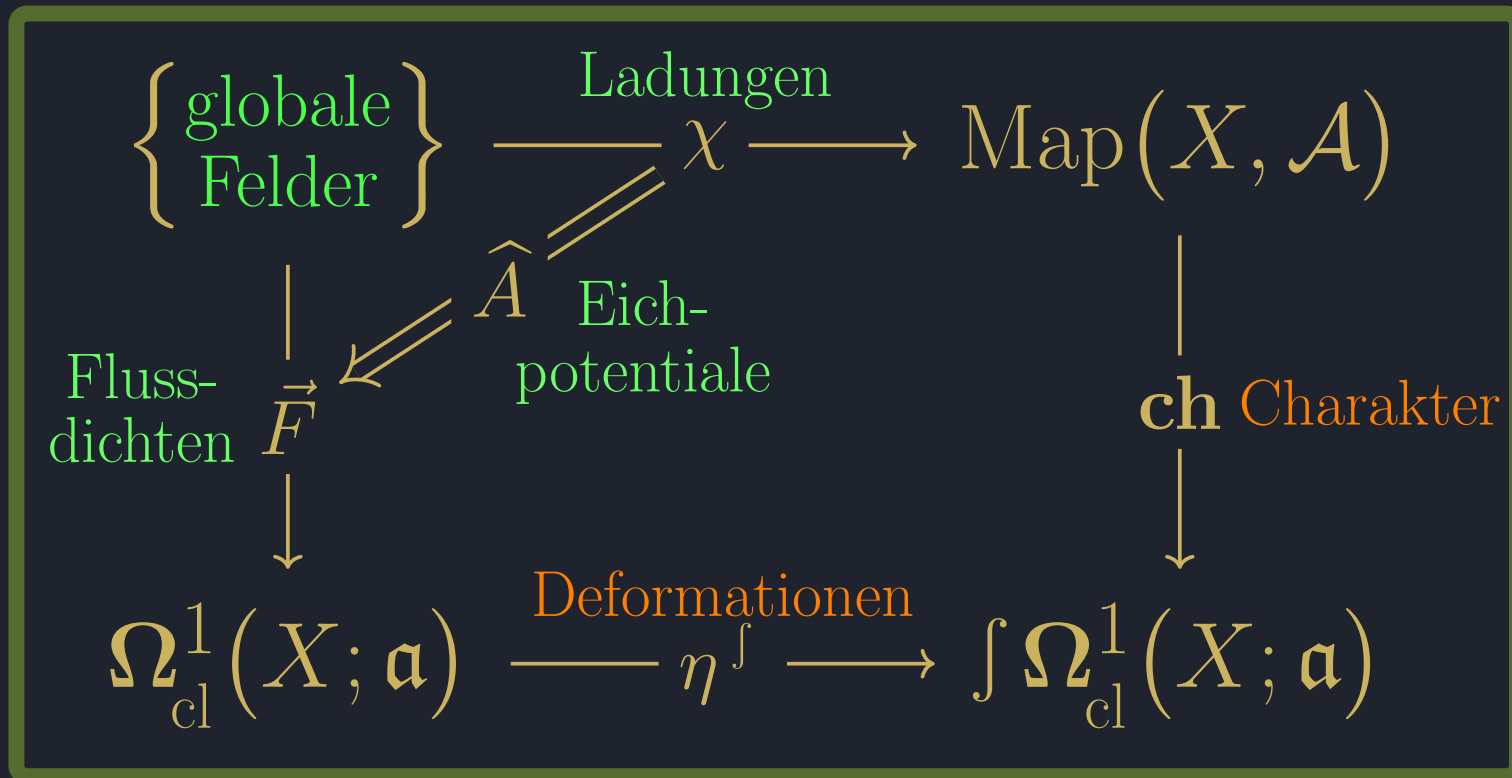


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:
 Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt* in einem *höher geometrischen Topos*.

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind: lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen, global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Feldbeschreibung muss dies vereinigen.

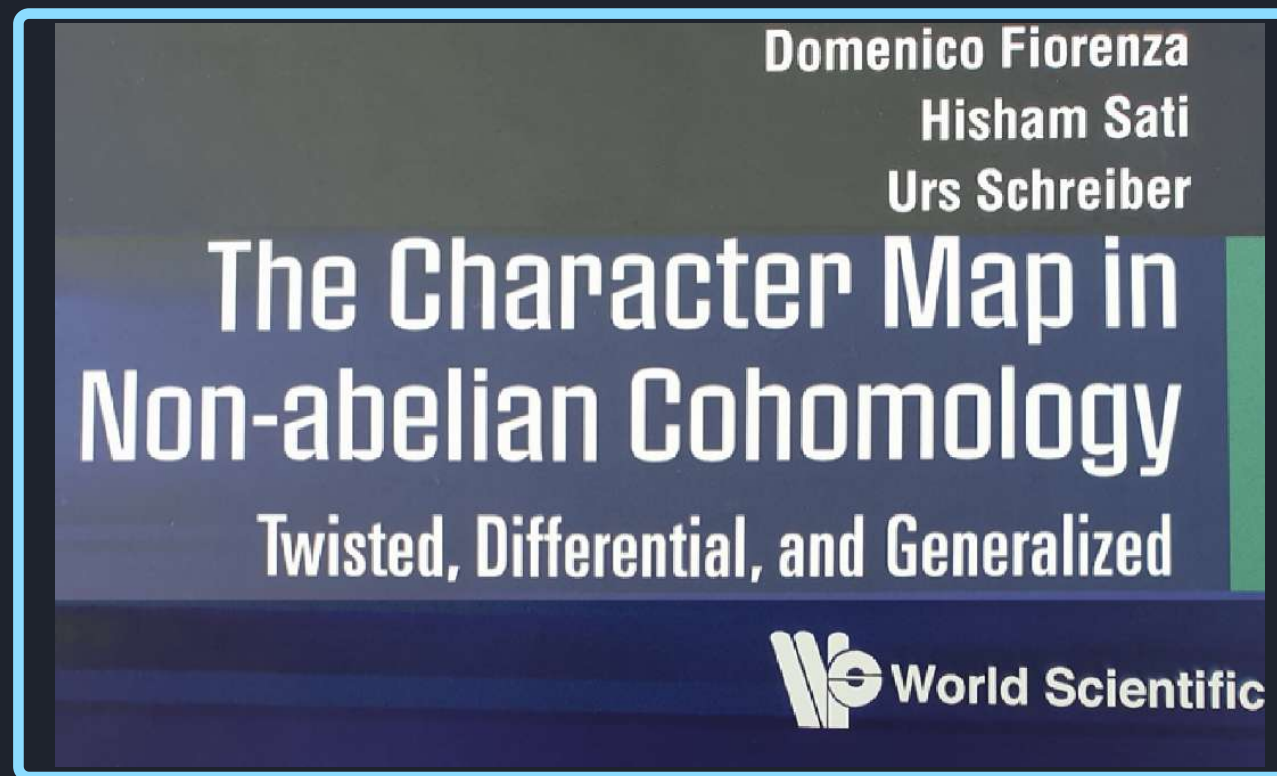


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:
Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt* in einem *höher geometrischen Topos*.

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind: lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen, global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Felddescription muss dies vereinigen.

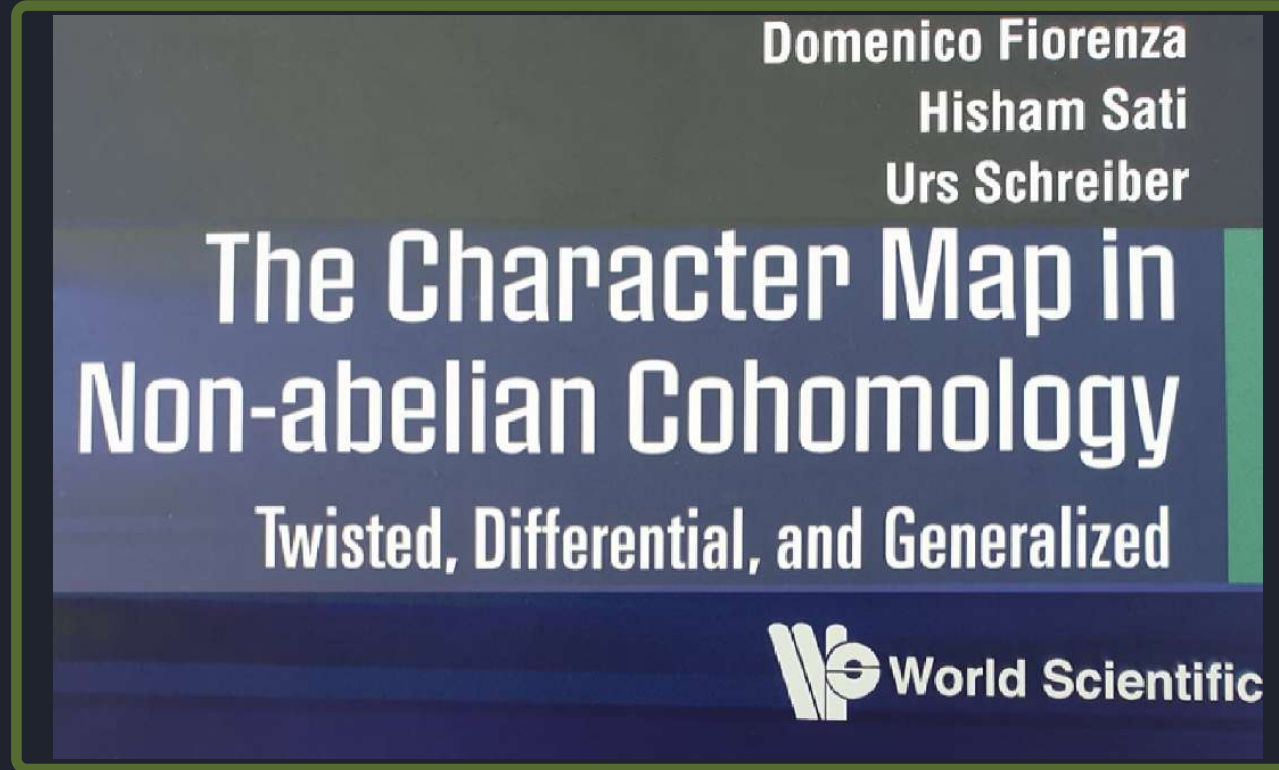


Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik:
Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt* in einem *höher geometrischen Topos*.

Nichtperturbativer Phasenraum

Wir haben gesehen, dass *physikalische Felder* beschrieben sind: lokal durch *Flussdichten* die Gaußgesetzen \mathfrak{a} unterliegen, global durch *Ladungen* in einem klassifizierenden Raum \mathcal{A} .

Die nichtperturbative Felddescription muss dies vereinigen.



Sowas existiert (nur) in einem neuartigen Universum der Mathematik: Es ist ein *Homotopie-Faserprodukt* in einem *höher geometrischen Topos*.

FLUSSDICHTEN

LADUNGEN

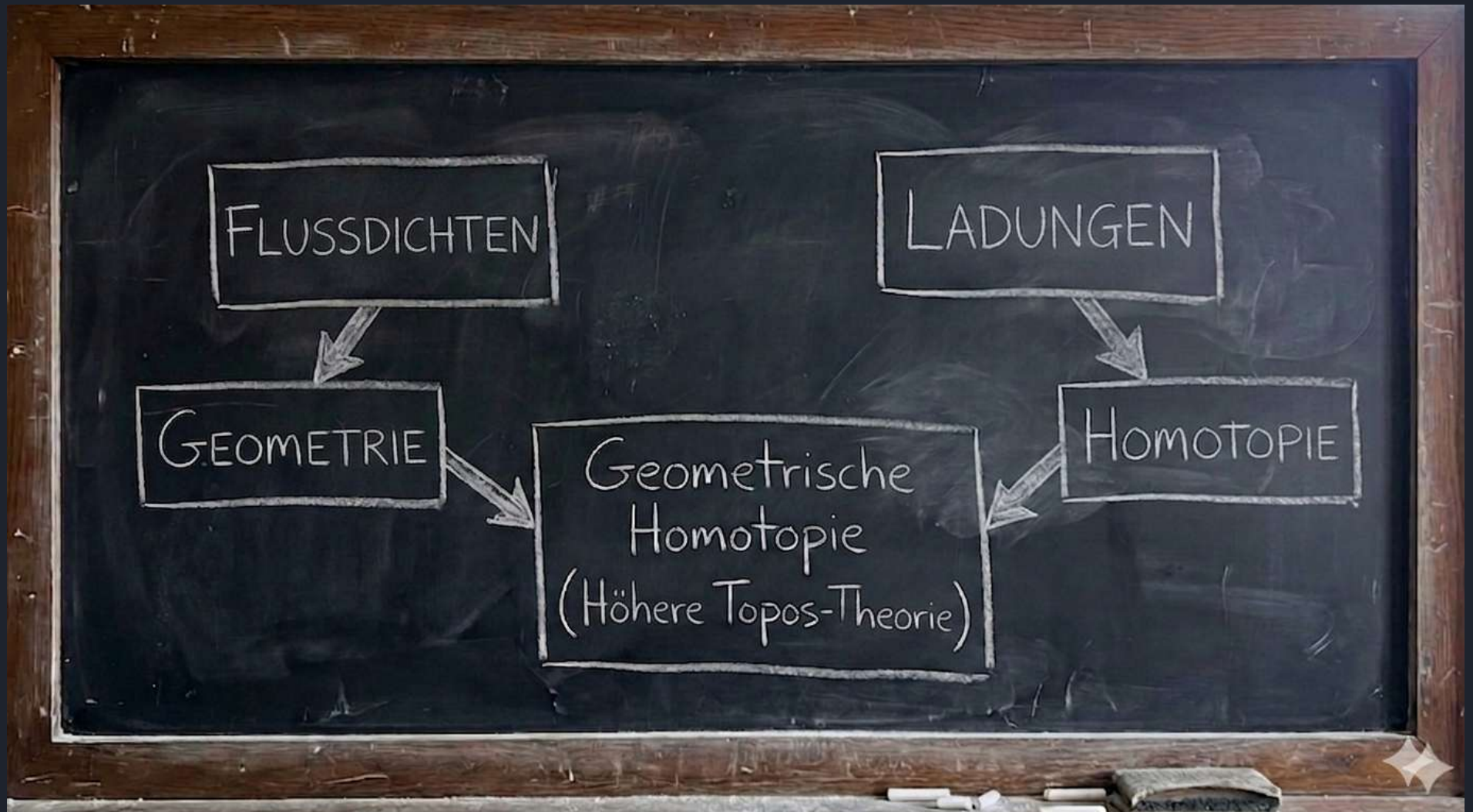
GEOMETRIE

HOMOTOPIE

Geometrische
Homotopie
(Höhere Topos-Theorie)



Also ist nichtperturbative Physik in höheren Topoi zu formulieren.

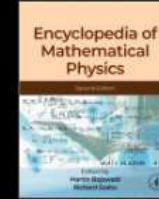


Also ist nichtperturbative Physik in höheren Topoi zu formulieren.



Encyclopedia of Mathematical Physics (Second Edition)

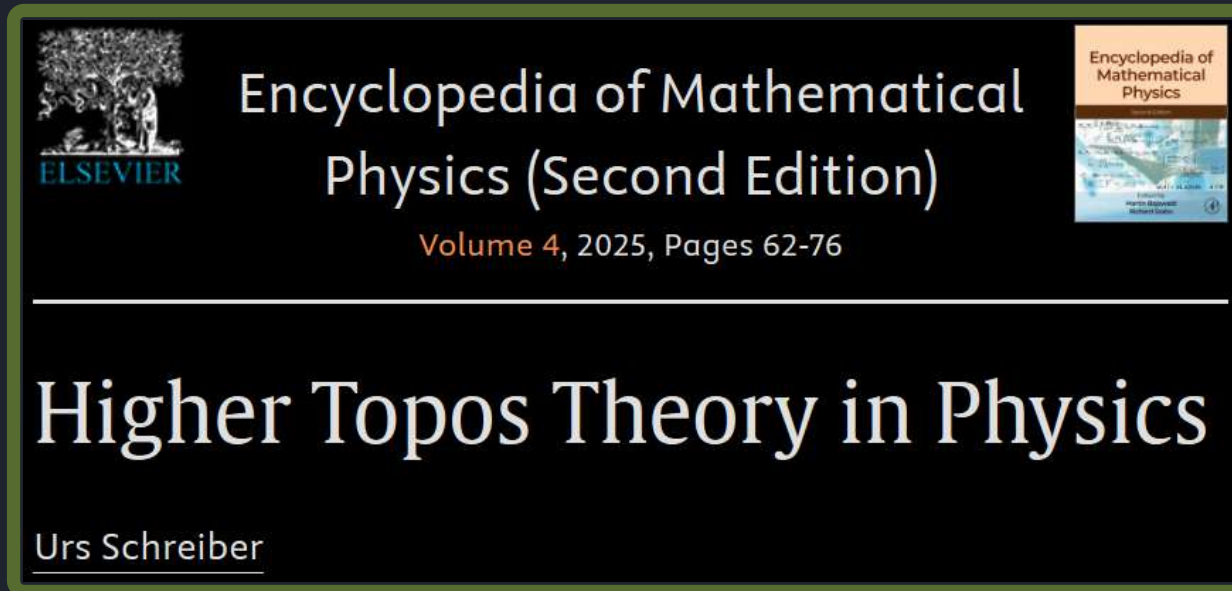
Volume 4, 2025, Pages 62-76




Higher Topos Theory in Physics

Urs Schreiber

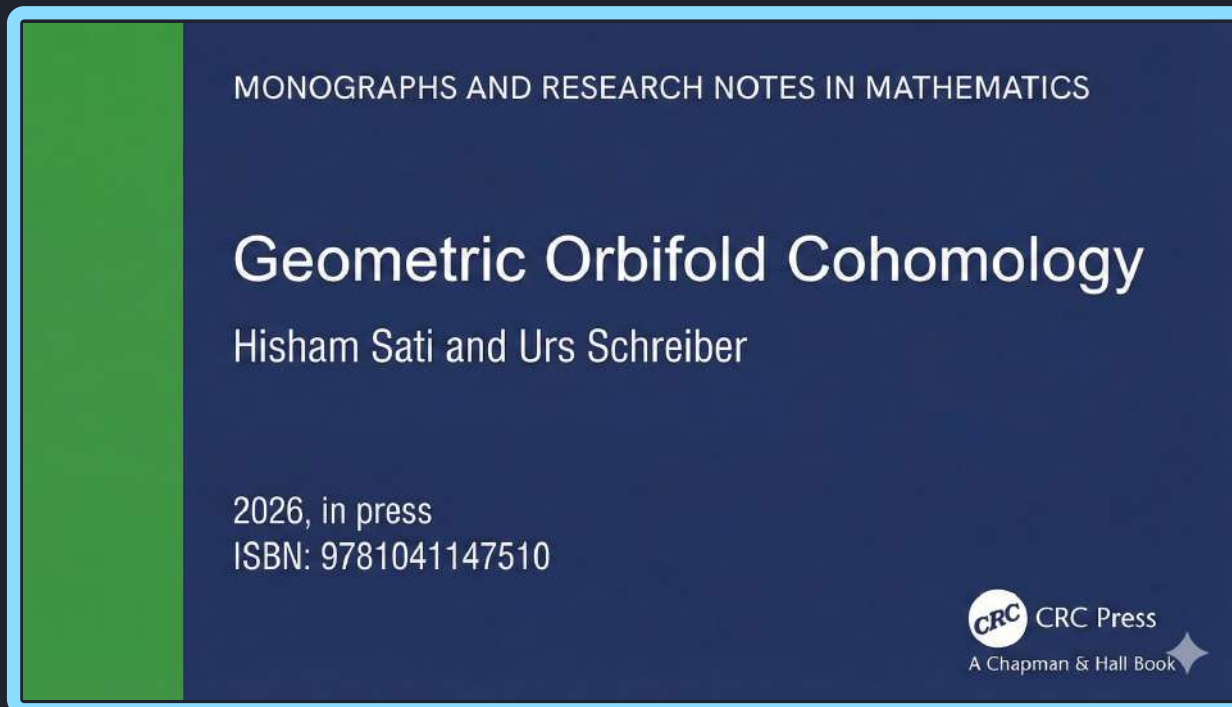
Also ist nichtperturbative Physik in höheren Topoi zu formulieren.



 Encyclopedia of Mathematical
Physics (Second Edition)
Volume 4, 2025, Pages 62-76

Higher Topos Theory in Physics


Urs Schreiber



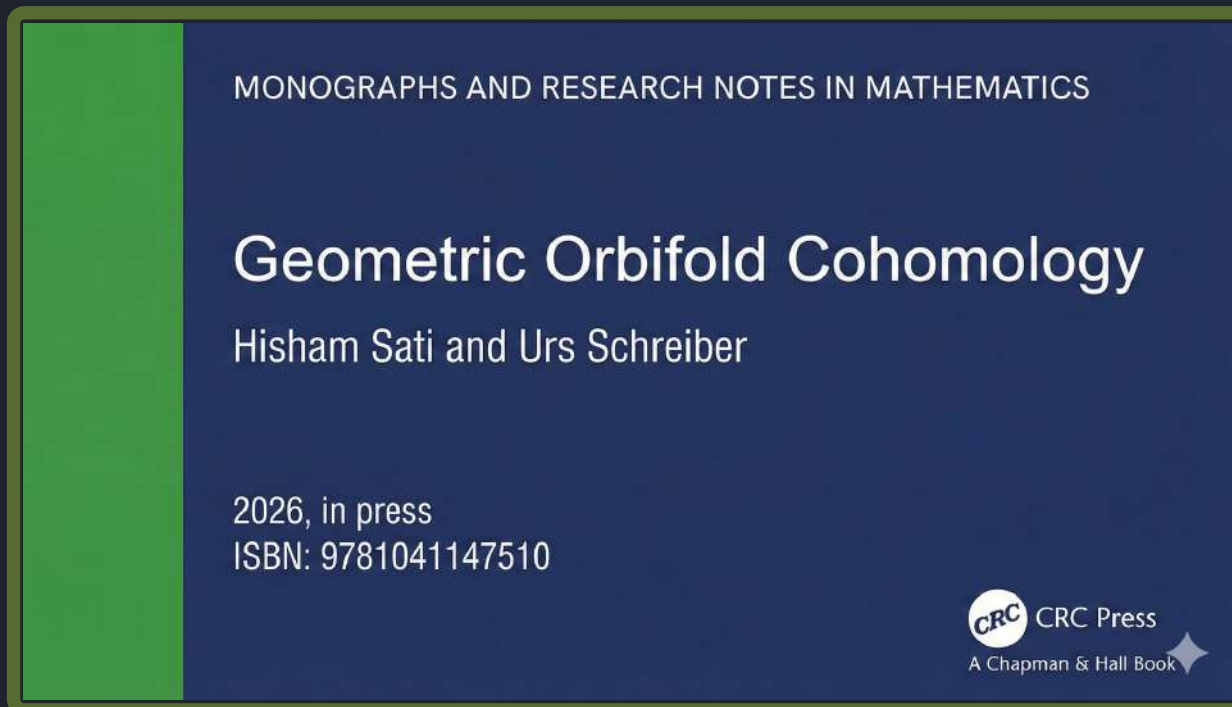
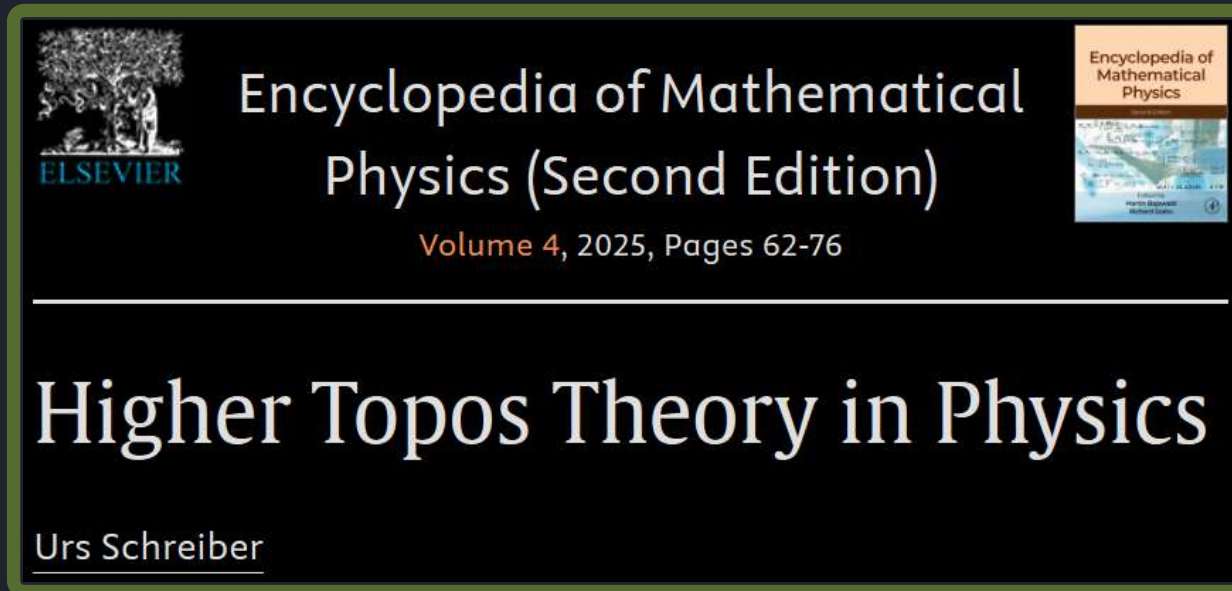
MONOGRAPHS AND RESEARCH NOTES IN MATHEMATICS

Geometric Orbifold Cohomology
Hisham Sati and Urs Schreiber

2026, in press
ISBN: 9781041147510

 CRC Press
A Chapman & Hall Book

Also ist nichtperturbative Physik in höheren Topoi zu formulieren.



Hin zu einer Programmiersprache für topologische Physik

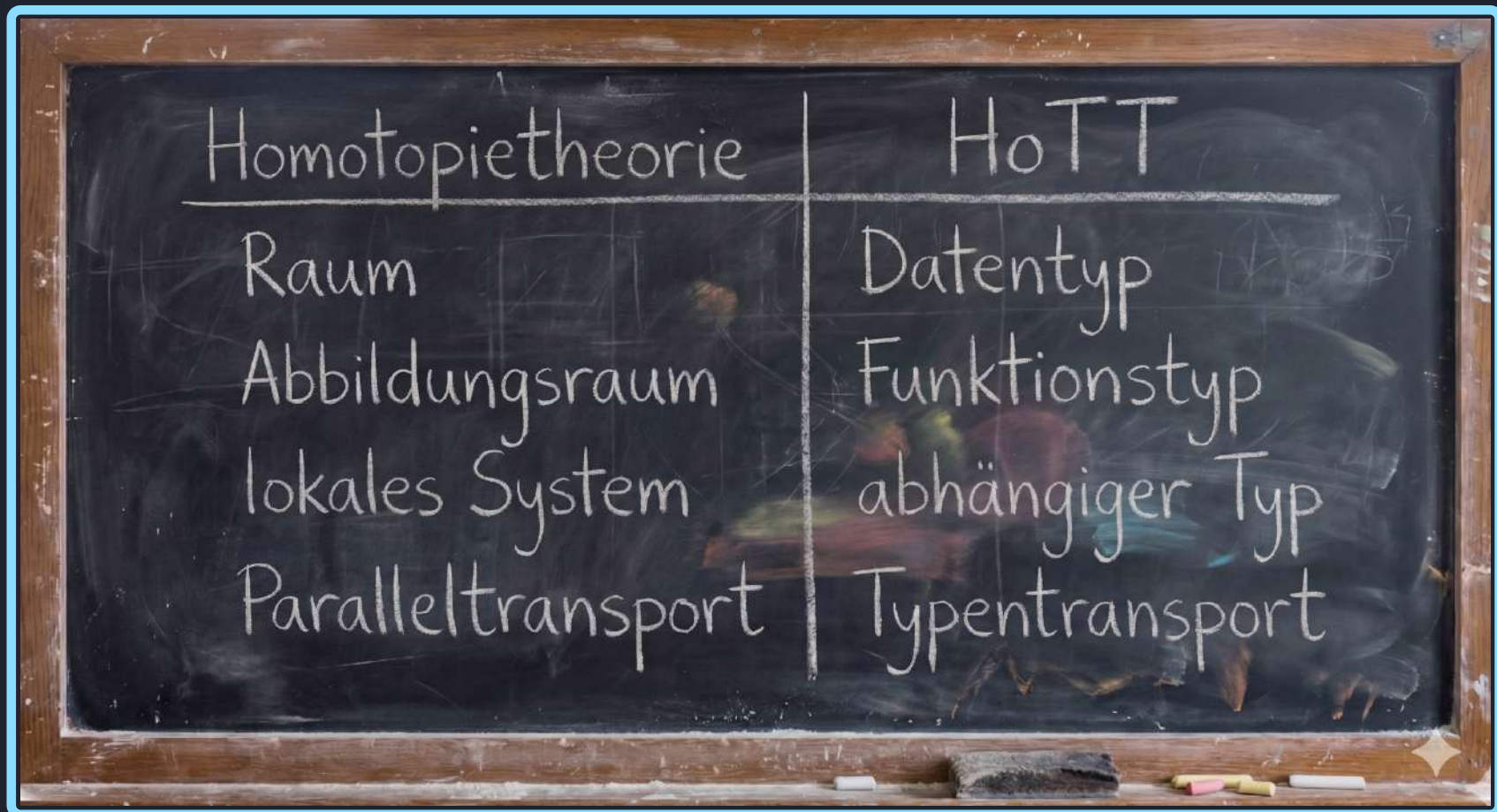
Obwohl höhere Topoi oft als unhandlich gelten
gilt das nur für ihre mengentheoretischen Modelle,

Hin zu einer Programmiersprache für topologische Physik

Obwohl höhere Topoi oft als unhandlich gelten
gilt das nur für ihre mengentheoretischen Modelle,
während die abstrakte Sprache höherer Topoi so elegant ist,
dass sie sogar als Programmiersprache existiert: **HoTT**

Hin zu einer Programmiersprache für topologische Physik

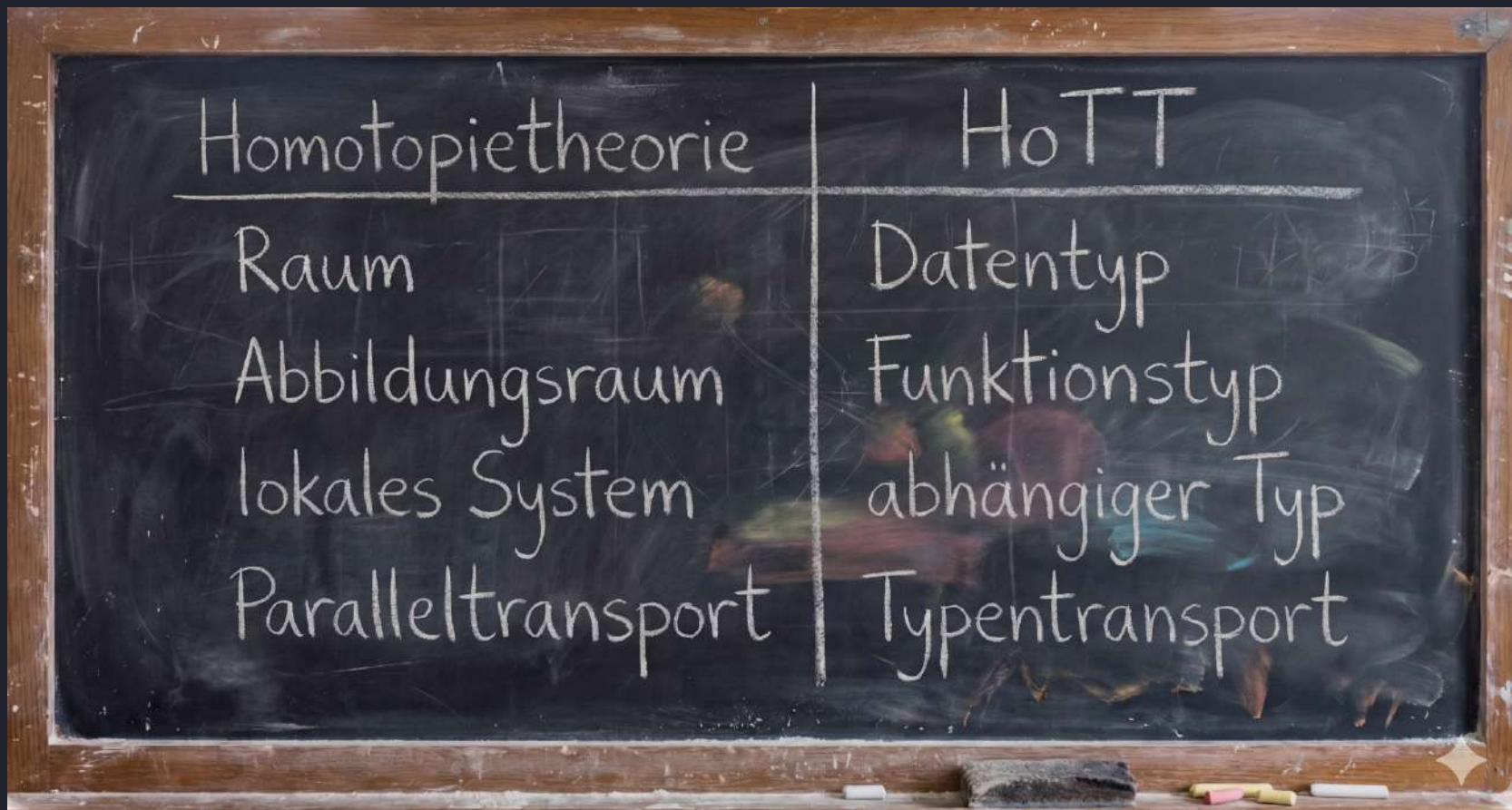
Obwohl höhere Topoi oft als unhandlich gelten gilt das nur für ihre mengentheoretischen Modelle, während die abstrakte Sprache höherer Topoi so elegant ist, dass sie sogar als Programmiersprache existiert: **HoTT**



Homotopietheorie	HoTT
Raum	Datentyp
Abbildungsraum	Funktionstyp
lokales System	abhängiger Typ
Paralleltransport	Typentransport

Hin zu einer Programmiersprache für topologische Physik

Obwohl höhere Topoi oft als unhandlich gelten gilt das nur für ihre mengentheoretischen Modelle, während die abstrakte Sprache höherer Topoi so elegant ist, dass sie sogar als Programmiersprache existiert: **HoTT**



Homotopietheorie	HoTT
Raum	Datentyp
Abbildungsraum	Funktionstyp
lokales System	abhängiger Typ
Paralleltransport	Typentransport

Das sind genau die Strukturen, denen wir hier begegnet sind!

Hin zu einer Programmiersprache für topologische Physik

Obwohl höhere Topoi oft als unhandlich gelten
gilt das nur für ihre mengentheoretischen Modelle,
während die abstrakte Sprache höherer Topoi so elegant ist,
dass sie sogar als Programmiersprache existiert: HoTT

Communications in Mathematical Physics

D.J. Myers, H. Sati and U. Schreiber:

Topological Quantum Gates in HoTT

Commun. Math. Phys. **405**, 172 (2024)

Springer Nature

 Springer Nature



Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Offenes Problem 2:

Stark korrelierte Elektronen:

Kontrolle topologischer Ordnung für sinnvolles Quantencomputing

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Offenes Problem 2:

Stark korrelierte Elektronen:

Kontrolle topologischer Ordnung für sinnvolles Quantencomputing

Herangehensweise:

- (1) Einbettung in höherdimensionale Feldtheorie
- (2) Globale Vervollständigung durch Flussquantisierung

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Offenes Problem 2:

Stark korrelierte Elektronen:

Kontrolle topologischer Ordnung für sinnvolles Quantencomputing

Herangehensweise:

- (1) Einbettung in höherdimensionale Feldtheorie
- (2) Globale Vervollständigung durch Flussquantisierung

Notwendige Mathematik ist **geometrische Homotopie** (höhere Topoi), eine neue Form globaler Mathematik für nichtperturbative Physik.

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Offenes Problem 2:

Stark korrelierte Elektronen:

Kontrolle topologischer Ordnung für sinnvolles Quantencomputing

Herangehensweise:

- (1) Einbettung in höherdimensionale Feldtheorie
- (2) Globale Vervollständigung durch Flussquantisierung

Notwendige Mathematik ist **geometrische Homotopie** (höhere Topoi), eine neue Form globaler Mathematik für nichtperturbative Physik.

Reich an Phänomenen aber extrem elegante Sprache (HoTT).
Mathematik des 21ten Jh. für das Jahrtausendproblem der Physik!?

Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales offenes Problem der Physik des 21ten Jahrhunderts:
Verständnis nichtperturbativer globaler Felder

Offenes Problem 1:

Hadronenbeutel von Quarks:

unbekannte hadronische Korrekturen infizieren alle SM Prozesse

Offenes Problem 2:

Stark korrelierte Elektronen:

Kontrolle topologischer Ordnung für sinnvolles Quantencomputing

Herangehensweise:

- (1) Einbettung in höherdimensionale Feldtheorie
- (2) Globale Vervollständigung durch Flussquantisierung

Notwendige Mathematik ist **geometrische Homotopie** (höhere Topoi), eine neue Form globaler Mathematik für nichtperturbative Physik.

Reich an Phänomenen aber extrem elegante Sprache (**HoTT**).
Mathematik des 21ten Jh. für das Jahrtausendproblem der Physik!?

Urs Schreiber

New York University Abu Dhabi
Center for Quantum & Topological
Systems



Ende

Materialien: ncatlab.org/schreiber/show/WIKO+2026

