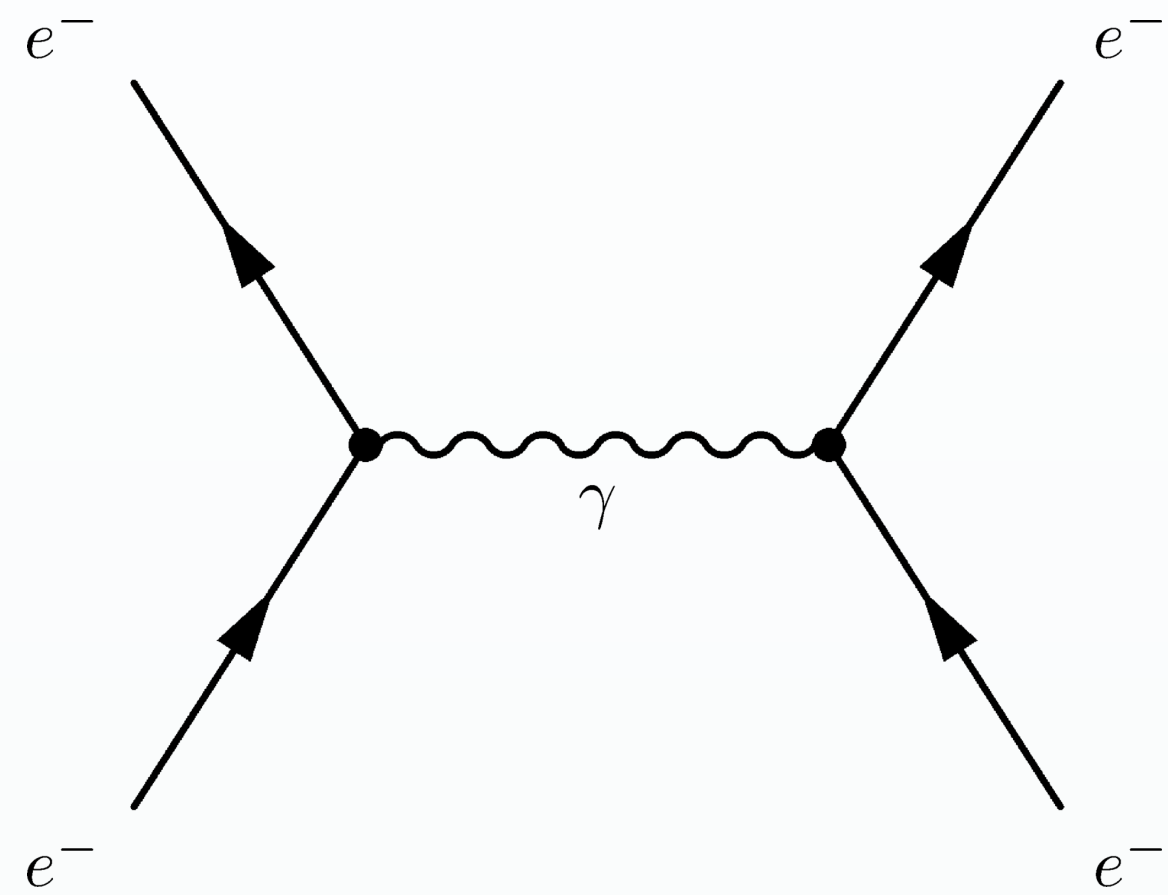


## Einleitung

Virtuelle Teilchen sind entscheidend für die Beschreibung fundamentaler Wechselwirkungen, haben jedoch nicht die Eigenschaften realer Teilchen. Sie existieren nur vorübergehend in nicht direkt beobachtbaren Phasen von Zerfällen oder anderen Prozessen. Trotz ihrer zentralen Rolle in der Teilchenphysik bleibt der Begriff vieldeutig und seine historische Entwicklung zeichnet sich durch anhaltende Bedeutungsverschiebungen und -erweiterungen aus. Wir untersuchen diese Veränderung mit Methoden der *digitalen Begriffsgeschichte* (Wevers und Koolen 2020).



Feynman-Diagramm zur elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen  $e^-$  durch den Austausch eines virtuellen Photons  $\gamma$  (Zeitachse von unten nach oben).

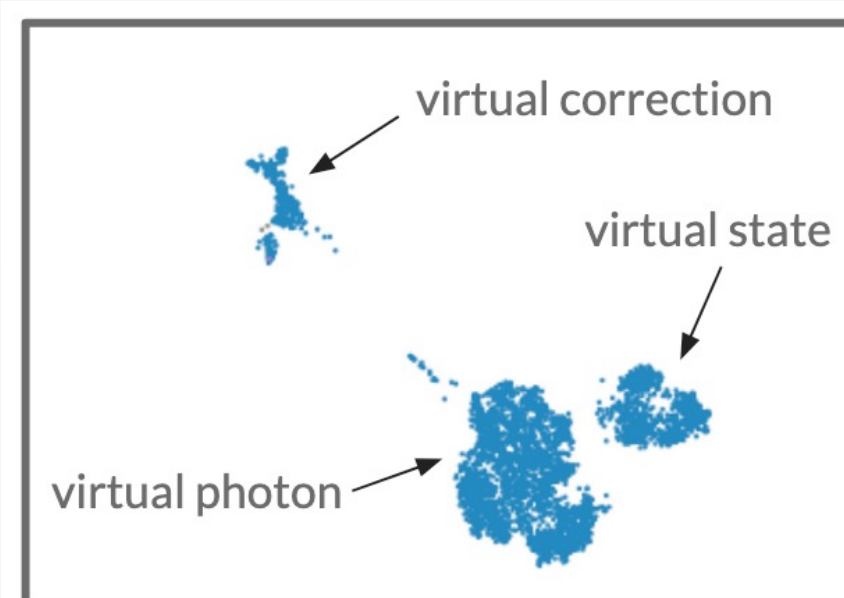
## Methode – Semantic Change Detection

## 1. Embedding

Domain Adaptation ->  
Kontextualisierte Word  
Embeddings mithilfe eines  
BERT-Modells

2. Bedeutungs-  
repräsentation

Zeitspezifische Bedeutungen  
von „virtual“ identifizieren  
(Clustering oder Durchschnitt)

3. Messen der  
Bedeutungs-  
verschiebung

Dominante  
Bedeutung

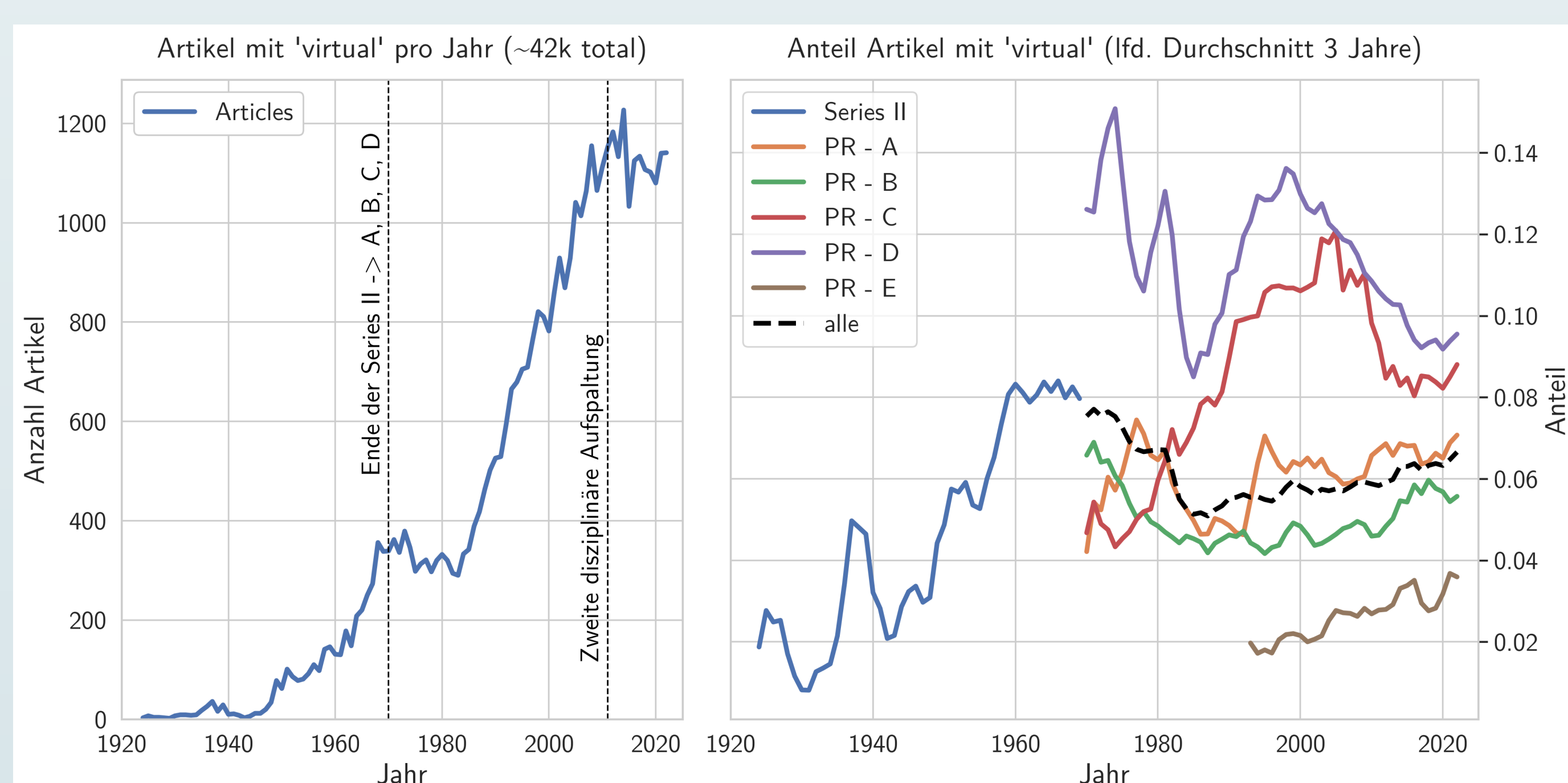
Veränderung des Schwerpunkts  
der Embeddings pro Jahr durch  
Cosinus-Ähnlichkeit.

Polysemie

Streuung der Embeddings im  
Vektorraum pro Jahr durch  
Shannon-Entropie.

## Datensatz – Physical Review Zeitschriften

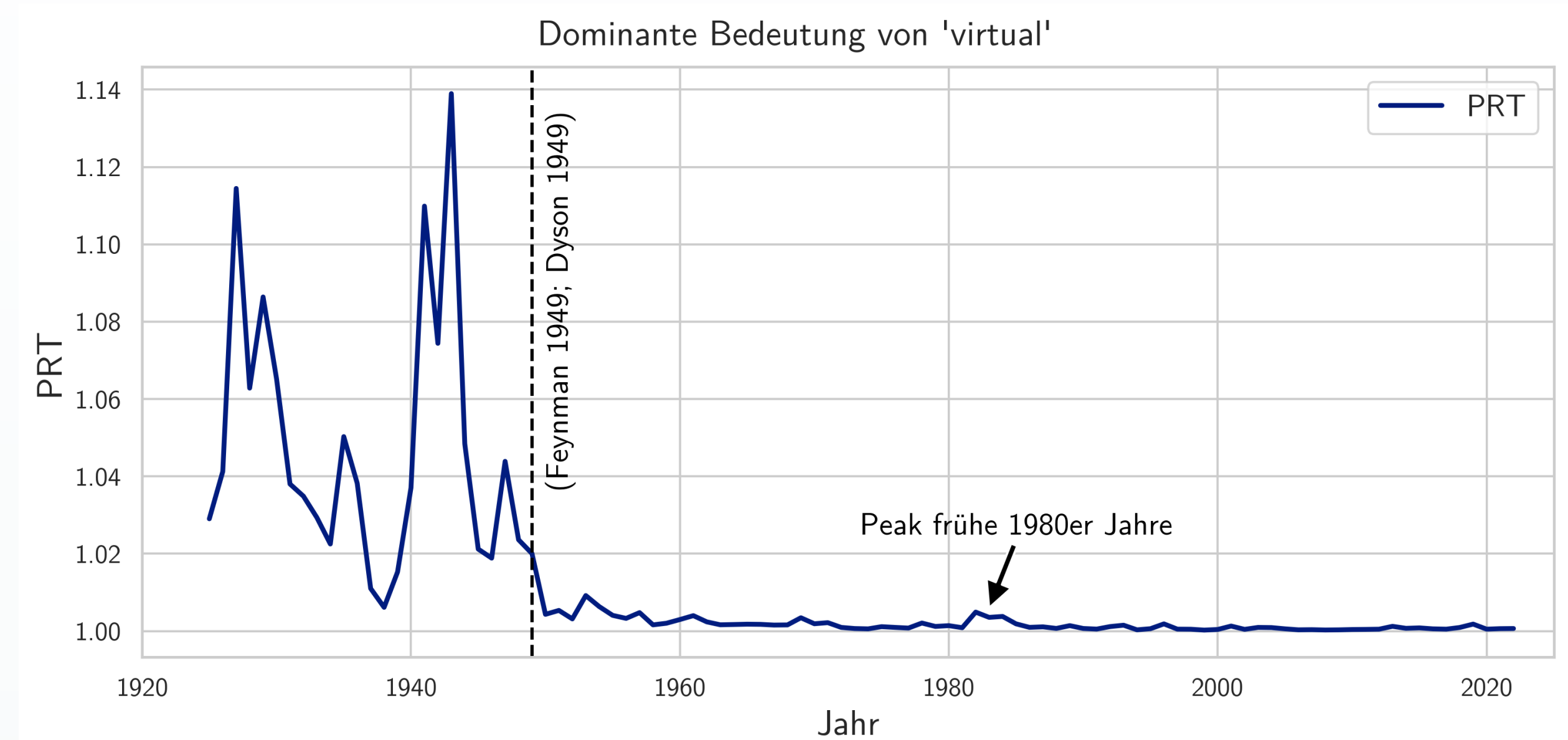
Unser Korpus umfasst Volltexte und Metadaten aus knapp 100 Jahren Physikforschung (1924 – 2022). Durch eine Vereinbarung mit der American Physical Society haben wir Zugriff auf die gesamte Zeitschriftenfamilie *Physical Review* (PR). Mithilfe einer Keyword-Suche nach dem Begriff „virtual“ in Titel, Volltext und Abstract von acht ausgewählten Zeitschriften (PR Series II, PR A – E, PR Letters, Reviews of Modern Physics) identifizieren wir ca. 42.000 Artikel, die für die Entwicklung des Konzepts des virtuellen Teilchens potenziell von Bedeutung sind.



Anzahl der veröffentlichten Artikel mit "virtual" im Physical-Review Korpus (links) und Anteil (laufender Durchschnitt über 3 Jahre) der Artikel mit "virtual" am Gesamtkorpus für ausgewählte Journals (rechts).

## Ergebnis 1 - Dominante Bedeutung stabilisiert sich

Ein zentrales Ergebnis unserer Studie ist die zunehmende Stabilisierung der dominanten Bedeutung von „virtual“, was auf eine Trennung der konzeptionellen Entwicklung des virtuellen Teilchens in zwei Phasen hinweist: Die erste Periode bis in die 1950er Jahre ist gekennzeichnet durch ausgeprägte Schwankungen, was auf wiederholte konzeptionelle Neuorientierungen während der frühen Entwicklung des Konzepts schließen lässt, ohne dass sich dabei bereits eine feste oder dominante Bedeutung herausgebildet hat.



Veränderung der dominanten Bedeutung von "virtual" mittels invertierter Kosinus-Ähnlichkeit (PRT).

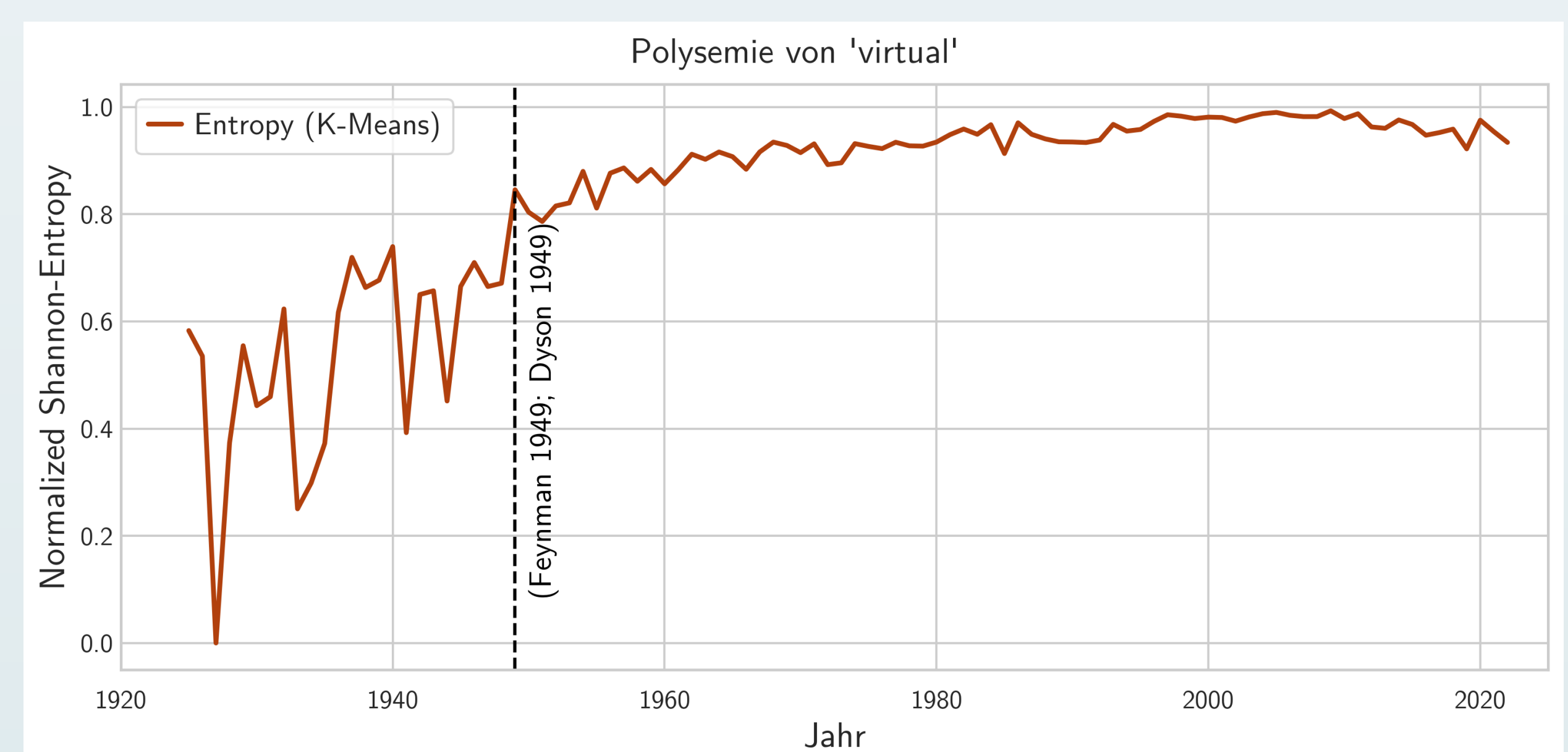
Diese Ergebnisse decken sich mit den qualitativen Erkenntnissen der Forschungsliteratur: Um 1950 tragen die Beiträge von Richard Feynman und Freeman J. Dyson (Feynman 1949; Dyson 1949) in der *Series II* wesentlich zur Etablierung des Konzepts des virtuellen Teilchens bei. Mit dem Beginn der zweiten Phase beginnt sich diese vorherrschende Bedeutung allmählich zu stabilisieren, ab 1950 erkennbar an den zunehmend dominanten Dependencies „photon“ und „state“ (siehe Tabelle). Unerwartet ist der Ausschlag in den frühen 1980er Jahren, welcher auf eine kurzfristige begriffliche Instabilität oder Neuorientierung hinweist.

Jahrzehnt	Top 1	Top 2	Top 3	Top 4
1920	cathode (23%)	orbit (14%)	oscillator (12%)	radiation (7%)
1930	height (22%)	level (18%)	state (9%)	oscillator (5%)
1940	height (13%)	quanta (11%)	level (8%)	state (8%)
1950	photon (11%)	state (10%)	meson (9%)	process (6%)
1960	photon (13%)	state (12%)	transition (5%)	excitation (5%)
1970	photon (21%)	state (11%)	excitation (5%)	transition (3%)
1980	photon (15%)	state (11%)	transition (4%)	excitation (4%)
1990	photon (14%)	state (8%)	transition (3%)	correction (3%)
2000	photon (14%)	state (8%)	correction (4%)	excitation (3%)
2010	photon (12%)	state (7%)	correction (4%)	process (3%)
2020	photon (14%)	state (7%)	correction (3%)	orbital (2%)

Top 4 lemmatisierte Dependencies für "virtual" pro Jahrzehnt. In Klammern steht der jeweilige Anteil an allen Dependencies pro Jahrzehnt.

## Ergebnis 2 - Grad der Polysemie nimmt zu

Der Grad der Polysemie nimmt über den gesamten Untersuchungszeitraum zu. Er schwankt zunächst in den frühen Jahren deutlich, nimmt ab 1950 immer langsamer zu und lässt sich somit ebenfalls grob in die zwei beschriebenen Phasen einteilen. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die Diversifizierung des Konzepts in den unterschiedlichen Disziplinen der Physik sein. Gleichzeitig bleibt die dominante Verwendung im Sinne des virtuellen Teilchens (insbesondere des virtuellen Photons) bestehen.



Veränderung des Grads der Polysemie von "virtual" mittels normalisierter Shannon-Entropie auf Grundlage von K-Means-Clustering.

## Referenzen

- American Physical Society. 2023. „APS Data Sets for Research“. <https://journals.aps.org/datasets>.
- Dyson, F. J. 1949. „The S Matrix in Quantum Electrodynamics“. *Physical Review* 75 (11): 1736–55.
- Ehberger, Markus. 2023. „From virtual oscillators to virtual transitions to virtual particles: Practices and representations in the formation of the virtual particle concept“. Phd.
- Feynman, R. P. 1949. „Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics“. *Physical Review* 76 (6): 769–89.
- Hamilton, William L., Jure Leskovec, und Dan Jurafsky. 2016. „Diachronic Word Embeddings Reveal Statistical Laws of Semantic Change“. In Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics.
- Periti, Francesco, und Stefano Montanelli. 2024. „Lexical Semantic Change through Large Language Models: a Survey“. *ACM Comput. Surv.* 56 (11): 282:1-282:38. <https://doi.org/10.1145/3672393>.
- Wevers, Melvin, und Marijn Koolen. 2020. „Digital begriffsgeschichte: Tracing semantic change using word embeddings“. *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History* 53 (4): 226–43.
- Zichert, Michael, und Adrian Wüthrich. 2024. „Tracing the Development of the Virtual Particle Concept Using Semantic Change Detection“. <https://ceur-ws.org/Vol-3834/paper95.pdf>.