

<b>Zeitschrift:</b>	Mitteilungen / Vereinigung Schweizerischer Versicherungsmathematiker = Bulletin / Association des Actuaires Suisses = Bulletin / Association of Swiss Actuaries
<b>Herausgeber:</b>	Vereinigung Schweizerischer Versicherungsmathematiker
<b>Band:</b>	43 (1943)
<b>Artikel:</b>	Gruppierung mit Nebenbedingungen
<b>Autor:</b>	Hadwiger, H.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-550867">https://doi.org/10.5169/seals-550867</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Gruppierung mit Nebenbedingungen.

Von *H. Hadwiger*, Bern.

Unter einer Gruppierung von  $n$  individuell unterscheidbaren Elementen wollen wir eine vollständige Zerlegung (Aufteilung) der gegebenen Elementgesamtheit in einzelne Gruppen verstehen. Durch

$$(1, 2, 3, 4, 5, 6) = (6) + (4, 1, 3) + (2, 5)$$

ist beispielsweise eine symbolische Darstellung einer Gruppierung von  $n = 6$  Elementen gegeben. Zwei Gruppen einer Gruppierung sollen nur dann als verschieden gelten, wenn die (ungeordneten) Mengen der in ihnen enthaltenen Elemente verschieden sind, so dass also eine eventuelle Anordnung der Elemente innerhalb der Gruppe unwesentlich ist. Ähnlich sollen zwei Gruppierungen der nämlichen Elementgesamtheit nur dann als verschieden bezeichnet werden, wenn die Mengen ihrer Gruppen ungleich sind, so dass auch hier die Anordnung der Gruppen keine Berücksichtigung findet. Die verschiedenen Gruppierungen für  $n = 4$  sind:

$$\begin{aligned} & (1) + (2) + (3) + (4) \\ & (1, 2) + (3) + (4) \\ & (1, 3) + (2) + (4) \\ & (1, 4) + (2) + (3) \\ & (2, 3) + (1) + (4) \\ & (2, 4) + (1) + (3) \\ & (3, 4) + (1) + (2) \\ & (1, 2) + (3, 4) \\ & (1, 3) + (2, 4) \\ & (1, 4) + (2, 3) \\ & (2, 3, 4) + (1) \\ & (1, 3, 4) + (2) \\ & (1, 2, 4) + (3) \\ & (1, 2, 3) + (4) \\ & (1, 2, 3, 4) \end{aligned}$$

In der vorliegenden Arbeit befassen wir uns mit der Anzahl der verschiedenen möglichen Gruppierungen, welche noch gewissen Nebenbedingungen zu genügen haben. So studieren wir die Anzahl  $A_{\nu,\lambda}^n$  der Gruppierungen, die genau  $\nu$  Gruppen ergeben, wobei aber die Anzahl der in den einzelnen Gruppen enthaltenen Elemente nicht grösser als  $\lambda$  sein soll. Nach der oben als Beispiel gegebenen Aufstellung der Gruppierungen für den Fall  $n = 4$  wird also

$$A_{1,4}^4 = 1, A_{2,2}^4 = 3, A_{2,3}^4 = 7, A_{3,2}^4 = 6, A_{4,1}^4 = 1$$

sein. Für  $\lambda = n$  entfällt offensichtlich die zusätzliche Nebenbedingung, und wir schreiben dann für die Anzahl der Gruppierungen mit  $\nu$  Gruppen kürzer  $A_\nu^n$ . So ist beispielsweise

$$A_1^4 = 1, A_2^4 = 7, A_3^4 = 6, A_4^4 = 1.$$

Unser Ziel ist, die explizite Lösung des durch die obigen Bemerkungen nahegelegten allgemeinen Problems so zu entwickeln, dass gewisse methodische Richtlinien, die uns zur Bearbeitung derartiger Fragestellungen der Kombinatorik geeignet erscheinen, deutlich zutage treten. Nebenbei werden einige Beziehungen zu gewissen Formeln der Analysis zur Geltung gebracht. Die Möglichkeit derartiger enger Zusammenhänge beruht auf der Tatsache, dass solche Formeln, wie sie etwa bei fortgesetzter Ableitung zusammengesetzter Funktionen (Formel von *Faà di Bruno*) oder bei Iteration gewisser Differentialoperatoren entstehen, in ihrem Aufbau einem kombinatorischen Prinzip unterworfen sind. Die mannigfaltigen Beziehungen, welche zwischen den vielen Einzelresultaten der alten und neuen Fachliteratur in dieser Hinsicht bestehen, sind fast unübersehbar<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> In den hier folgenden Erläuterungen treten wir kurz auf einige Berührungs-punkte ein, die zwischen der bestehenden Fachliteratur und unserer Studie bestehen. — Kombinatorische Interpretationen für Entwicklungskoeffizienten in Formeln fortgesetzter Derivation, die mit unserm Fragenkreis zusammenhängen, wurden beispielsweise von *H. S. Wall*, On the  $n$ -th derivative of  $f(x)$ ; Bull. Amer. Math. Soc. **44** (1938), 395—398, und in allgemeinerer Form von *J. Opatowski*, Combinatoric interpretation of a formula for the  $n$ -th derivative of a function; Bull. Amer. Math. Soc. **45** (1939), 944 gegeben. In der letztgenannten Arbeit handelt es sich um eine Deutung der Koeffizienten in der Derivations-formel von *Faà di Bruno*. Die Zahlen  $A_\nu^n$  treten in anderer Bedeutung bereits in der klassischen Analysis auf; sie finden sich beispielsweise als Koeffizienten der Entwicklung des Differentialoperators  $(xD)^n$  nach den Potenzen  $D^\nu$  ( $D$  bedeutet

Wie einleitend erwähnt, bezeichne

$$(1) \quad A_{r,\lambda}^n \quad (1 \leq \lambda \leq n, 1 \leq r \leq n)$$

die Anzahl der Gruppierungen von  $n$  Elementen in  $r$  Gruppen unter der Nebenbedingung, dass die Anzahl der in den einzelnen Gruppen enthaltenen Elemente die Schranke  $\lambda$  nicht übertrifft.

die Ableitung nach  $x$ ). Vgl. hierüber die Arbeiten von *S. Pincherle*, *Bulletino U. M. I.*, 11 (1936), 72—74, und *L. Toscano*, *Ist. Lombardo, Rend.* 11, 67 (1934), 543—551. Eine merkwürdige Interpretation der Zahlen  $A_r^n$  gab *Scherk*, Über einen allgemeinen, die Bernoullischen Zahlen und die Coefficienten der Secantenreihe zugleich darstellenden Ausdruck, *J. f. Math.* 4 (1829), 299, wonach  $A_r^n$  die Summe der  $\binom{n-1}{n-r}$  Produkte bezeichnet, die durch die Kombinationen der  $r$  Zahlen  $(1, 2, \dots, r)$  zur  $(n-r)$ -ten Klasse mit Wiederholungen gegeben ist. So ist beispielsweise

$$A_3^6 = 90 = 1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 \cdot 3 + 1 \cdot 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2 \cdot 3 + 1 \cdot 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 \cdot 2 + \\ + 2 \cdot 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 \cdot 3 + 3 \cdot 3 \cdot 3.$$

Eingehende Studien widmete *L. Saalschütz*, Vorlesungen über die Bernoullischen Zahlen, Berlin 1893, den Zahlen  $C_r^n = A_{r+1}^{n+1}$ , die in verschiedenen Formeln und Reihen auftreten. Erwähnt sei die klassische Formel von *Eytelwein* zur Darstellung der *Bernoullischen Zahlen*. Wir möchten darauf hinweisen, dass die in der analogen Darstellungsformel von *Laplace* auftretenden Koeffizienten, die eng mit unsrern Zahlen verwandt sind, in jüngster Zeit eine neue, beachtliche kombinatorische Interpretation durch *L. von Schrutka*, Eine neue Einteilung der Permutationen, *Math. Ann.* 118 (1941), 246—250, erfahren haben. Es handelt sich um die Klassifikation der Permutationen nach der Zahl der enthaltenen Aufstiege. Die bei uns entwickelte explizite Darstellung der Zahlen  $A_r^n$  zeigt eine bemerkenswerte Verwandtschaft mit der *Laplaceschen Polynomformel* (*Théorie analytique des probabilités*, 196) für die Verteilungsfunktion

$$\Phi_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\sin t}{t} \right)^n \cos xt dt,$$

welche bei der kontinuierlichen Behandlung eines Aufteilungsproblems ebenfalls eine wesentliche Rolle spielt. Vgl. hierüber *H. Hadwiger*, Über gleichwahrscheinliche Aufteilungen, *Zeitschrift für angewandte Math. und Mechanik* 22 (1942), 226—232, besonders Formel (4) und (10). Eine Darstellung der Potenz  $x^n$  durch die Binomialpolynome  $\binom{x}{i}$ , welche wir im Laufe der Entwicklung streifen, wurde u. a. auch von *J. A. Joseph*, *Ann. math. Statist.* 10 (1939), 293—296, studiert, wobei auch Beziehungen zu den *Eulerschen* und *Bernoullischen Zahlen* festgestellt worden sind.



Ordnet man die oben gekennzeichneten Gruppierungen in der folgenden Weise, dass man zunächst diejenigen Gruppierungen auf-führt, in welchen das  $n$ -te Element für sich eine Gruppe bildet, dann diejenigen, in welchen das bezeichnete Element mit genau einem weiteren, dann mit zwei weiteren usw. Elementen eine Gruppe bildet, so führt die mit dieser Einteilung verbundene Abzählung zur Rück-laufformel

$$(2) \quad A_{r,\lambda}^n = \sum_{i=0}^{\lambda-1} \binom{n-1}{i} A_{r-1,\lambda}^{n-1-i}.$$

Es ist für unsere einzuschlagende analytische Methode charakteristisch, die den zu studierenden Zahlen zugeordneten Polynome

$$(3) \quad T_{n,\lambda}(x) = \sum_{r=1}^n A_{r,\lambda}^n x^r, \quad T_{0,\lambda}(x) = 1, \quad n \geq 1$$

zu betrachten. Durch passendes Multiplizieren mit Potenzen von  $x$  kann die Rücklaufformel (2) in eine solche für die Polynome (3) übergeführt werden, nämlich in

$$(4) \quad T_{n,\lambda}(x) = x \sum_{i=0}^{\lambda-1} \binom{n-1}{i} T_{n-1-i,\lambda}(x).$$

Besondere Beachtung verdient neben dem Fall  $\lambda = n$ , den wir später ausführlicher betrachten, noch der Spezialfall  $\lambda = 2$ . Nach der Rücklaufformel (4) berechnet man schrittweise

$$\begin{aligned} T_{0,2}(x) &= 1, \\ T_{1,2}(x) &= x, \\ T_{2,2}(x) &= x^2 + x, \\ T_{3,2}(x) &= x^3 + 3x^2, \\ T_{4,2}(x) &= x^4 + 6x^3 + 3x^2, \\ T_{5,2}(x) &= x^5 + 10x^4 + 15x^3, \\ T_{6,2}(x) &= x^6 + 15x^5 + 45x^4 + 15x^3. \end{aligned}$$

Wie wir an dieser Stelle bereits vorwegnehmen wollen, steht das Polynom  $T_{n,2}(x)$  in einem engen Zusammenhang mit dem Hermi-

teschen Polynom  $H_n(x)$ , das in der üblichsten Weise durch die Differenzierungsformel

$$(6) \quad e^{-\frac{x^2}{2}} H_n(x) = D^n e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \left\{ D \equiv \frac{d}{dx} \right\}$$

definiert wird, und zwar gilt die Darstellung

$$(7) \quad T_{n,2}(x) = (\sqrt{-x})^n H_n(\sqrt{-x}).$$

Durch

$$(8) \quad a_n = \sum_{v=1}^n A_{v,2}^n = T_{n,2}(1), \quad n \geq 1,$$

wird die Zahl aller möglichen Gruppierungen von  $n$  Elementen in Einer- und Zweiergruppen geliefert. Wir weisen hier darauf hin, dass die Zahl  $a_n$  nach dieser Interpretation beispielsweise die Anzahl der verschiedenen selbstreziproken Permutationen  $P$  von  $n$  Elementen wiedergibt. Mit Rückblick auf (7) können diese Zahlwerte als Funktionswerte der Hermiteschen Polynome dargestellt werden, und zwar gilt

$$(9) \quad a_n = (i)^n H_n(i) \quad \{i = \sqrt{-1}\}.$$

Wir erwähnen noch die sich aus (4) ergebende Rücklaufformel

$$(10) \quad a_{n+1} = a_n + n a_{n-1}, \quad n \geq 1, \quad a_0 = 1.$$

So ergeben sich die Zahlwerte

$n$	$a_n$
1	1
2	2
3	4
4	10
5	26
6	76
7	232
8	764
9	2620
10	9496

Ein weiterer entscheidender Schritt bei der Durchführung unserer analytischen Methode besteht darin, für die eingeführten Polynome (3) eine erzeugende Funktion zu ermitteln. Die grosse Bedeutung einer solchen erzeugenden Funktion ist offensichtlich. Als vollständiger Repräsentant des zu untersuchenden Zahlenschemas birgt sie alle seine Gesetze in ihren vielgestaltigen Formen und ist doch eine Einheit. Einmal gewonnen, wird sie einen geeigneten Ausgangspunkt für irgendwelche Untersuchungen sein, da sie als Funktion allen methodischen Zugriffen der Analysis zugänglich ist. Wir bilden die erzeugende Funktion

$$(11) \quad \Phi_\lambda(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} T_{n,\lambda}(x) \frac{z^n}{n!},$$

und es stellt sich nun die Frage, ob sich diese Funktion in elementar geschlossener Form darstellen lässt. Auf Grund der Rücklaufformel für die Koeffizientenpolynome (3) ergibt sich die (partielle) Differentialgleichung

$$(12) \quad \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial z} - x \left( 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \dots + \frac{z^{\lambda-1}}{(\lambda-1)!} \right) \Phi_\lambda = 0,$$

so dass sich mit Rücksicht auf die Anfangsbedingung

$$(13) \quad \Phi_\lambda(x, 0) = 1$$

die erzeugende Funktion

$$(14) \quad \Phi_\lambda(x, z) = e^{x \left( z + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots + \frac{z^\lambda}{\lambda!} \right)}$$

als Lösung ergibt.

Als erstes Beispiel eines sich auf Grund der Kenntnis der erzeugenden Funktion (14) ergebenden Resultates erwähnen wir die Identität (7), welche aus

$$(15) \quad \Phi_2(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (\sqrt{-x})^n H_n(\sqrt{-x}) \frac{z^n}{n!}$$

direkt abgelesen werden kann, einer Identität, welche sich durch Vergleich von (14) mit der Erzeugung

$$(16) \quad e^{-xw - \frac{w^2}{2}} = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(x) \frac{w^n}{n!}$$

der Hermiteschen Polynome leicht ergibt, wenn man  $x$  durch  $\sqrt{-x}$  und  $w$  durch  $\sqrt{-x}z$  ersetzt.

Im Folgenden treten wir eingehender auf den Spezialfall  $\lambda = n$  ein. Da die Anzahl der Elemente in einer Gruppe trivialerweise nicht grösser als  $n$  ausfallen kann, ist die Nebenbedingung praktisch aufgehoben. Wir setzen dann etwas kürzer

$$(17) \quad A_v^n = A_{v,n}^n$$

und übertragen die Rücklaufformel (2) in

$$(18) \quad A_v^n = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} A_{v-1}^{n-1-i}.$$

Für die zugeordneten Polynome

$$(19) \quad T_n(x) = \sum_{v=1}^n A_v^n x^v, \quad T_0(x) = 1, \quad n \geq 1$$

erhalten wir analog die formal beachtliche Rekursion

$$(20) \quad T_{n+1}(x) = x \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} T_i(x),$$

welche zur schrittweisen Berechnung der Polynome herangezogen werden kann. Es ergibt sich

$$T_0(x) = 1,$$

$$T_1(x) = x,$$

$$T_2(x) = x^2 + x,$$

$$T_3(x) = x^3 + 3x^2 + x,$$

$$T_4(x) = x^4 + 6x^3 + 7x^2 + x,$$

$$T_5(x) = x^5 + 10x^4 + 25x^3 + 15x^2 + x,$$

$$T_6(x) = x^6 + 15x^5 + 65x^4 + 90x^3 + 31x^2 + x.$$

Besondere Bedeutung erhalten die Zahlwerte

$$(21) \quad C_n = \sum_{\nu=1}^n A_\nu^n = T_n(1), n \geq 1,$$

welche die Gesamtzahlen der überhaupt möglichen Gruppierungen von  $n$  Elementen darstellen. Nach (18) genügen sie der Rekursion

$$(22) \quad C_{n+1} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} C_i.$$

Es ergeben sich die Zahlwerte

$n$	$c_n$
1	1
2	2
3	5
4	15
5	52
6	203
7	877
8	4140
9	21147
10	115975

Die erzeugende Funktion der Polynome (19)

$$(23) \quad \Phi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} T_n(x) \frac{z^n}{n!}$$

wird offenbar durch

$$(24) \quad \Phi(x, z) = e^{x(e^z - 1)}$$

gegeben sein. Hierzu ist zu bemerken, dass die Nebenbedingung natürlich auch wegfällt, wenn wir statt  $\lambda = n$  formal  $\lambda = \infty$  setzen. Der zweite Ansatz liefert die gewünschte Spezialisierung simultan für alle  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  und ist offensichtlich notwendig für die Spezialisierung der erzeugenden Funktion.

Eine kleine durchsichtige Umrechnung bei der geläufigen Darstellung der Entwicklungskoeffizienten der Funktion (24) bei der

Reihenentwicklung nach Potenzen von  $z$  durch die höheren Ableitungen (im Nullpunkt) führt auf die Identität

$$(25) \quad e^x T_n(x) = (x D)^n e^x \quad \left\{ D = \frac{d}{dx} \right\}$$

wodurch ein Zusammenhang der Zahlen (17) mit der Entwicklung des Differentialoperators  $xD$  aufgedeckt wird. Die gewonnene Identität gestattet übrigens, zu einer expliziten Darstellung der Zahlen (17) vorzudringen. Wenn wir nämlich die Exponentialfunktion auf der rechten Seite in (25) als Potenzreihe anschreiben und dann den Differentialoperator gliedweise wirken lassen, so gewinnen wir zunächst die Darstellung

$$(26) \quad T_n(x) = e^{-x} \left\{ x + 2^n \frac{x^2}{2!} + 3^n \frac{x^3}{3!} + 4^n \frac{x^4}{4!} + \dots \right\} n \geq 1.$$

Wenn wir nun auch hier die Exponentialfunktion als Reihe einsetzen und die Multiplikation durchführen, so liefert ein Vergleich der Koeffizienten gleicher Potenzen auf beiden Seiten die gewünschte Darstellung

$$(27) \quad A_\nu^n = \frac{1}{\nu!} \sum_{i=0}^{\nu} (-1)^i \binom{\nu}{i} (\nu - i)^n.$$

Aus (25) leitet man auf naheliegende Weise die Differentialrekursion

$$(28) \quad T_{n+1}(x) = x \{ T'_n(x) + T_n(x) \}$$

ab, welche in Übertragung auf die Koeffizienten die weitere Rücklaufformel

$$(29) \quad A_\nu^{n+1} = A_\nu^n + A_{\nu-1}^n$$

ergibt, die sich offensichtlich auch kombinatorisch deuten lässt.

Die in derartigen Fällen geläufige Anwendung des Theorems von Rolle auf die Differentialrekursion (28) gestattet den Schluss, dass die Polynome  $T_n(x)$  genau  $n$  verschiedene, reelle (negative) Nullstellen aufweisen.

Aus der Tatsache, dass die erzeugende Funktion (24) der Funktionalgleichung

$$(30) \quad \Phi(x, z)\Phi(y, z) = \Phi(x + y, z)$$

genügt, leitet man noch die Gültigkeit des Additionstheorems

$$(31) \quad T_n(x + y) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} T_{n-i}(x) T_i(y)$$

ab. Eine weitere Eigenschaft der Zahlen (17) ergibt sich dadurch, dass wir in (25) auf beiden Seiten die Exponentialfunktion durch ihre Potenzreihe ersetzen, links ausmultiplizieren und die Koeffizienten vergleichen. So erhalten wir zunächst

$$\sum_{\nu=0}^n \nu! A_\nu^n \binom{k}{\nu} = k^n,$$

und da diese Relation für alle  $k$  richtig ist, muss die Identität

$$(32) \quad \sum_{\nu=0}^n \nu! A_\nu^n \binom{x}{\nu} = x^n$$

gelten.

Wir kehren zu dem mit (25) Ausdruck gegebenen Zusammenhang mit dem Differentialoperator  $(xD)$  zurück. Wir können das Wesentliche dieser Formel von der dort in Erscheinung tretenden Exponentialfunktion loslösen. In der Tat gilt nämlich

$$(33) \quad (xD)^n = \sum_{\nu=0}^n A_\nu^n x^\nu D^\nu,$$

oder mit symbolischer Schreibweise

$$(34) \quad (xD)^n = T_n(xD).$$

Um dies zu zeigen genügt es, z. B. induktiv festzustellen, dass die geschriebene Potenz des Differentialoperators  $xD$  eine Darstellung der angegebenen Form mit noch nicht weiter bestimmten Koeffizienten gestattet. Die Gegenüberstellung mit der speziellen Differenzierungsformel (25) liefert dann die zu beweisende Identität (33).

---