Fach: Theoretische Physik

PrüferIn: Schmalian

BP NP SF EF NF LA Datum: 29. Juni 2020 Fachsemester: 8

Welche Vorlesungen wurden geprüft? Theo D, E, F

Welche Vorlesung der PrüferIn hast Du gehört? Theo Fa und Fb

Zur Vorbereitung

Absprache mit PrüferIn über folgende Themengebiete: keine Absprache

Absprache mit PrüferIn über Literatur/Skripte: keine Absprache

Verwendete Literatur/Skripte: Theo D: Schmalian Skript zusammengefasst, eigener Klinkhammer-Mitschrieb nochmal gelesen,

Theo E: eigener Zeppenfeld-Mitschrieb und einige Melnikov-Skript-Kapitel (z.B. Streuung) zusammengefasst

Theo F: Schmalian Skripte zusammengefasst, Mirlin Skript gelesen

Literatur: die ersten 2 Kapitel im Sakurai zusammengefasst, ansonsten habe ich Sakurai, Nolting_6 und Gernot Münster (Quantentheorie) zum Nachschlagen verwendet, Marx&Gross für Landau-Nivaus und die magnetische Länge in 2D und natürlich dauerhaft Wikipedia :)

Dauer der Vorbereitung: 10 Wochen, zu Beginn nur ca 4h am Tag und freie Wochenenden, die letzten 4 Wochen sehr intensiv

Art der Vorbereitung: alleine gelernt und mit einem Kommilitonen ca 3 Wochen gegenseitig Protokolle abgefragt. Er hatte seine Prüfung bei Zeppenfeld, daher habe ich noch einige andere Fragen kennengelernt

Allgemeine Tips zur Vorbereitung: Professor Schmalian legt viel Wert auf ein physikalisches Verständnis und dass man flüssig rechnen kann (Landau Niveaus!!!). Schaut euch zu Beginn der Lernphase die Protokolle einmal an. Es lohnt sich, seine Skripte sehr genau gelesen zu haben.

Zur Prüfung

Wie verlief die Prüfung? Ich habe Prüfungsangst und war nervlich total am Ende zu Beginn der Prüfung. Daraufhin kochte Schmalian erstmal Kaffee und fing die Prüfung 3 Minuten später an und erzählte mir erstmal irgendwas über das Leben von DeBroglie. Ich konnte mich entspannen und die darauffolgende Prüfungsatmosphäre war sehr entspannt. Schmalian ist der perfekte Prüfer für Leute mit Prüfungsangst, er gibt sich wirklich Mühe für eine entspannte Atmosphäre zu sorgen!

Wie reagierte die PrüferIn, wenn Fragen nicht sofort beantwortet wurden? Er wartet solange man am Nachdenken ist; wenn man hängen bleibt, gibt er Tipps. Er setzt es darauf an, einen zumindest einmal eine unbekannte Rechnung durchzuführen. Man muss Probleme allerdings nicht völlig alleine aus dem Stehgreif lösen, es reicht wenn man die nötigen Formeln parat hat und die Zusammenhänge kennt, er hilft dann etwas nach, alles zusammenzusetzen.

Kommentar zur Prüfung: Super entspannte Atmosphäre! Nur zu empfehlen!

Kommentar zur Benotung: 1.0

Die Schwierigkeit der Prüfung: inhaltlich: Energiefluktuationen für ein kanonisches Ensemble herleiten und im thermodynamischen Limes betrachten
allgemein: damit umgehen zu können, eine unbekannte Rechnung durchzuführen

Die Fragen

S: Schmalian\\

I: ich\\

S: Welche Idee hat DeBroglie? \\

I: Welle-Teilchen Dualismus, z.B Beugungsexperimente mit Elektronen am Doppelspalt haben Interferenz gezeigt analog zu den Beugungsexperimenten mit Lichtwellen. $p = \hbar \cdot k = \hbar \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$
Seine Idee war also, Teilchen eine Wellenlänge zuzuordnen.\\

S: Ausgehend von dieser Idee versuchte Schrödinger eine Gleichung aufzustellen. Wie sieht diese aus und wie kam er auf genau diese Form auf Basis von DeBroglie? \\

I: Schrödingergleichung hingeschrieben, ebene Welle hingeschrieben $\psi = \exp\{ikx - i\omega t\}$ und diese in einen allgemeinen Wellengleichungsansatz $\text{const} \cdot \frac{d^n}{dx^n} \psi = \frac{d^l}{dt^l} \psi$ eingesetzt. Erklärt, dass trotzdem die Dispersionsrelation des Teilchens erfüllt werden muss, dh. für ein freies Teilchen $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \hbar \omega$ nach ω umgeformt einsetzen. Damit k auf beiden Seiten in gleicher Ordnung dasteht, muss man nochmal ψ nach x ableiten. (Hier hat er mich unterbrochen. Theoretisch muss man jetzt nur noch die Konstante durch Vergleichen bestimmen und sagen, dass in niedrigster Ordnung $n=2$ und $l=1$ gewählt werden kann) \\

S: Was ist die Interpretation von ψ ? \\

I: Wellenfunktion, beschreibt den Zustand eines Systems vollständig, in der obigen Rechnung in Ortsbasis aufgeschrieben, allgemein aber ein abstrakter Vektor (Ket) im Hilbertraum. Physikalische Größen (Observablen) werden durch hermitesche Operatoren im Hilbertraum beschrieben, deren reelle Eigenwerte die möglichen Messwerte meines Systems bezüglich dieser Observablen sind. Man projiziert bei einer Messung den Zustand des Systems auf die Eigenkets der Observable und das Betragsquadrat von diesem Skalarprodukt ist die Wahrscheinlichkeit dafür, den jeweiligen Eigenwert des Operators zu messen. Die Wellenfunktion alleine ist also eine Art Wahrscheinlichkeitsamplitude. \\

S: Wie ist das ψ normiert? \\

I: $\int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \psi dx = 1$ \\

S: Dieses ψ ist ja jetzt noch zeitabhängig. Schreiben Sie also mal noch t in die Argumente. Gilt die Normierung jetzt nur für einen Zeitpunkt x ? \\

I: Die Zeitentwicklung des Systems ist durch die Schrödingergleichung gegeben, daraus kann man den unitären Zeitentwicklungsoperator $U = \exp\{-iHt/\hbar\}$. Diese Form gilt jetzt nur für zeitunabhängige Hamiltonian, sonst würde da ein Integral über $H(t)$ stehen und falls die $H(t)$ zu verschiedenen Zeiten nicht vertauschen, dann muss man das noch als zeitgeordnete Reihe schreiben. Da U unitär ist, ändert sich das Betragsquadrat der Wellenfunktion nicht (kurz $1 = U^{-1}U$ zwischen $\langle \psi(t) | \psi(t) \rangle$ aufgeschrieben) und damit gilt die Normierungsbedingung für beliebige Zeiten. (Die Unitarität war ihm sehr wichtig)\\

S: Es gibt ja Gleichungen für die zeitliche Entwicklung von Dichten. Gibt es ein Analogon in der Quantenmechanik? \\

I: Ja, Kontinuitätsgleichung aufgeschrieben und $\rho = \psi^* \psi$. \\

S: Wie sieht dann dieser Wahrscheinlichkeitsstrom aus? \\

I: $\vec{j} = \frac{\hbar}{2mi} (\psi^* \nabla \psi - (\nabla \psi^*) \psi)$, kurz erklärt, dass man die Schrödingergleichung für ein freies Teilchen einfach in die Kontinuitätsgleichung einsetzt, die Gradienten bekommt man aus dem Impuls.\\

S: Okay, anderes Thema. Betrachten Sie ein Teilchen im homogenen B-Feld. Wie gehen Sie vor? \\

I: Minimale Kopplung einführen: $H = \frac{1}{2m} (\vec{p} - e\vec{A})^2 + e\phi$ in SI-Einheiten, erklärt, dass $\vec{A}$ das Vektorfeld ist und ϕ ein skalares Feld. Wollte den $+e\phi$ -Term mit den Worten "aber Sie wolltet ja nur ein B-Feld" wegwischen, aber er meinte, ich sollte es mal stehen lassen.\\

S: Da steht ja jetzt ein $\vec{A}$, dass aber verschieden gewählt werden kann. Ist der Hamiltonian jetzt variant? \\

I: Ja, der Hamiltonian ist variant, aber die Schrödingergleichung ist trotzdem invariant. Wenn man das $\vec{A}$ -Feld umeicht ($\vec{A} \rightarrow \vec{A} + \nabla f$), wobei f eine skalare, ortsabhängige Funktion ist, muss man auch ϕ transformieren ($\phi \rightarrow \phi - \frac{\partial f}{\partial t}$) und die Wellenfunktion ebenfalls ($\psi \rightarrow \psi \cdot \exp\{\frac{ief}{\hbar}\}$). Die messbaren physikalischen Größen, z.B. das B-Feld ist ebenfalls invariant unter Eichtransformation da in $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ die Rotation des Gradienten Null ist. (bin mir nicht ganz sicher mit den VZ bei den Eichtrafos)\\

S: Wie sieht das denn jetzt mit dem Wahrscheinlichkeitsstrom aus, wie ändert er sich unter Eichtransformation? \\

I: Er ist invariant. Erklärt, dass wenn man den Wahrscheinlichkeitsstrom von dem Hamiltonian mit minimaler Kopplung ausrechnet, ein zusätzlicher Term $-\frac{e}{m}(\vec{A} + \nabla f)|\psi|^2$ in j auftritt (∇f durch Umeichung), aber ein weiterer Term $+\frac{e}{m}(\nabla f)|\psi|^2$ auftritt, weil eine Phase an die Wellenfunktion multipliziert wird. Die Terme mit ∇f heben sich also weg. \\

S: Kennen Sie den Aharonov-Bohm-Effekt? Was passiert denn da? \\

I: Beginne mit den Worten: Dieser Effekt hat mich immer verwirrt. Er beschreibt ein Doppelspaltexperiment mit Elektronen, bei dem eine sehr lange Spule zwischen den Spalten liegt. Die Spule ist für die Elektronen nicht durchdringbar. Wenn in der Spule ein Magnetfeld erzeugt wird, so verschiebt sich das Interferenzmuster auf dem Schirm. Obwohl das Magnetfeld außerhalb der Spule Null ist (deshalb sehr lange Spule), ist das Vektorfeld ungleich Null, daher muss ich meine Wellenfunktion umeichen. Die Phasendifferenz der beiden Spalte auf dem Schirm kann man berechnen durch $\Delta\phi = \int_{r_1}^{r_2} \vec{A} \cdot d\vec{r} - \int_{r_1}^{r_2} \nabla f \cdot d\vec{r}$. Grenzen des 2. Integrals und Vorzeichen vor Integral umdrehen, jetzt steht da ein geschlossenes Wegintegral über A (geschlossen, da der Effekt ja auch für einzelne Elektronen auftritt, die mit sich selbst interferieren). Wegintegral, da das Vektorfeld sich im Raum ändert). Geschlossenes Wegintegral mit Satz von Stokes als $\int \nabla \times \vec{A} \cdot d\vec{S}$ umschreiben und $\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$ daher entspricht die Phasendifferenz gerade dem magnetischen Fluss in der Spule. \\

S: Teilchen in 2 Dimensionen im homogenen B-Feld in z-Richtung. Wie sieht das Spektrum aus? \\

I: Das kann man auf einen Harmonische Oszillator zurückführen, man bekommt Landau-Niveaus: $E = \hbar\omega(n + \frac{1}{2})$. \\

S: Zeigen Sie, dass man auf einen Harmonischen Oszillator kommt! \\

I: $H = \frac{1}{2m}(p_x - eA_x)^2 + \frac{1}{2m}(p_y - eA_y)^2 = \frac{1}{2m}(\pi_x^2 + \pi_y^2)$, jetzt stehen hier ja schon zwei Größen, die quadratisch in den Hamiltonian eingehen. Wenn man zeigen kann, dass $[\pi_x, \pi_y] \propto i\hbar B$, dann hat man in diesem Problem die gleiche algebraische Grundstruktur wie beim HO und daher hat das Problem das gleiche Spektrum. Er wollte dann nur wissen, was bei dem Kommutator rauskommt und ich wusste auswendig, dass $[\pi_x, \pi_y] \propto i\hbar B$, die Rechnung wollte er nicht sehen. \\

S: Wie ist der Entartungsgrad der Energieniveaus? \\

I: Auf unendlicher Fläche in x-y-Ebene unendlich. \\

S: Ein unendlicher Entartungsgrad gefällt uns in der Physik ja nicht so gut. In der Realität betrachten wir ja sehr große, aber endliche Flächen, zB. in einem Festkörper. Wie verändert das die Entartung? \\

I: Wenn man das mit einem gewählten Vektorfeld ($A = (-By, 0, 0)$) durchrechnen würde, dann sieht man, dass der HO in der y-Richtung um ein y_0 , dass von k_x abhängt, verschoben ist. y_0 ist das Zentrum der Oszillation, hier wirkt die Kraft ein. Dieses Zentrum muss logischerweise innerhalb der Fläche $0 \leq y_0 \leq L_y$ liegen. $y_0 \propto k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_x$ einsetzen, dann sieht man $n_x \leq B \cdot L_x \cdot L_y$. (Ich hab die Aufgabe schon mehrfach durchgerechnet und kannte die Proportionalitäten, das empfiehlt sich auch, da er fast immer Landau-Niveaus abfragt) \\

S: Das stimmt so schon alles, aber jetzt müsste ich hier ja eigentlich meckern, n_x hat ja nicht die Einheit $B \cdot L_x \cdot L_y$. \\

I: schreibe $\cdot \text{konst.}$ dazu \\

S: Interpretieren Sie das Ergebnis! Und wie kann man denn jetzt über die Einheiten diese Konstante bestimmen? \\

I: Also wir haben jetzt einen endlichen Entartungsgrad proportional zu B und der Fläche... (verwirrt, komme mir etwas doof vor, die Proportionalität steht ja schon an der Tafel)...ähm...also ich hab mir das immer so vorgestellt das die Teilchen mit gleichem Impulsbetrag auf Kreisbahnen kondensieren... \\

S: Naja, schauen Sie mal, was Sie davor beim Aharonov-Bohm-Effekt hingeschrieben haben \\

I: (ich schaue noch verwirrt) \\

S: Naja, Sie haben es ja eigentlich schon gesagt, das B-Feld mal die Fläche ist der magnetische Fluss. \\

I: (ich erkenne was er meint, nicke und hoffe, dass er was anderes fragt, weil ich immer noch nicht ganz verstehe, was er mir sagen will) \\

S: Nun, wie sieht das jetzt mit den Einheiten aus? \\

I: Also hier steht Länge im Quadrat also m^2 und das magnetische Feld in SI-Einheiten ist... Ich schaue ratlos die Tafel an und versuche versuche mir eine Formel auszudenken, bei der ich alle Einheiten außer dem B-Feld kenne \\

S: unterbricht mich: Sie sind ja verrückt! Die ganzen SI-Einheiten kennt doch niemand auswendig, oder zumindest ich nicht. Schauen sie sich doch mal den Hamiltonian an. Da steht doch Ladung mal Vektorfeld und das muss die gleiche Einheit haben wie der Impuls. \\

I: Impuls ist $\hbar$ geteilt durch Länge, das Vektorfeld ist also $\hbar$ geteilt durch (e mal Länge) und das damit ist die Rotation des Vektorfeldes $\hbar$ geteilt durch (e mal Länge-Quadrat) (Ich habe mich dezent dämlich angestellt und er durfte mir das quasi diktieren). Aaah, also fehlen da noch e geteilt durch $\hbar$ in der Formel für den Entartungsgrad. \\

S: Erzählen Sie mir mal, was Sie zur Dirac-Gleichung wissen. \\

I: Dirac-Gleichung hingeschrieben. Die Dirac-Gleichung beschreibt relativistische, freie, geladene Spin-1/2-Teilchen. Die Gleichung ist lorentzinvariant. Außerdem erfüllt die relativistische Energiedispersion (hingeschrieben). ψ ist ein vierkomponentiger Spinor und die drei Komponenten des $\vec{\alpha}$

und das β sind 4×4 -Matrizen. Diese erfüllen die Antikommutator-Relationen $\{\alpha_i, \alpha_j\} = 2\delta_{ij}$ und $\{\alpha_i, \beta\} = 0$. Das sieht man, wenn man den Hamiltonian quadriert und mit der Dispersionsrelation vergleicht. Aus $\alpha_i^2 = \beta^2$ sieht man, dass die Eigenwerte ± 1 sind. Mit den Antikommutatoren kann man zeigen, dass die Matrizen spurlos sind $\text{tr}(\alpha_i) = \text{tr}(\beta)$ (Spur zyklisch) und aus EW mit Spurlosigkeit folgt, dass die Dimension der Matrizen geradzahlig sein muss. Für 2d-räumliche Systeme kann man die Paulimatrizen verwenden, für 3d-räumliche Systeme braucht man 4×4 -Matrizen. \\

S: Wofür stehen die verschiedenen Komponenten im Spinor? \\

I: Wenn man die relativistische Dispersionsrelation bezüglich E invertiert, erhält man eine Wurzel mit positiven und negativen Lösungen für die Energie, daher interpretiert man dann je zwei Komponenten als Teilchen- bzw. Antiteilchenlösung. Und da wir Spin-1/2-Teilchen betrachten, hat man noch jeweils eine Spin-up- und eine Spin-down-Komponente. \\

S: Sie haben ja jetzt motiviert, warum wir Teilchen- und Antiteilchenlösungen haben. Wie kann man zeigen, dass es sich bei den anderen zwei Freiheitsgraden um den Spin handelt? \\

I: Experimentell? Naja, Spin ist eine halbzahlige Drehimpulsquantenzahl, das hat man beim Stern-Gerlach-Experiment gesehen. Eine Aufspaltung nach dem Bahndrehimpuls hätte ja 3 Streifen auf dem Schirm geben müssen (oder 1, oder 5, je nach Drehimpuls...) \\

S: Was macht man den beim Stern-Gerlach-Experiment? \\

I: Da schickt man Silberatome durch ein inhomogenes Magnetfeld und spaltet den Teilchenstrahl bezüglich der Spinkomponente in B-Feld-Richtung auf. Aber ich glaube, dass mit der Spinkomponente wird auch deutlich, wenn man den nichtrelativistischen Limes der Dirac-Gleichung berechnet, da steht dann auch gerade ein Term mit $\vec{B} \cdot \vec{\sigma}$ und die Sigma-Matrizen beschreiben den Spin. \\

S: Genau, man legt also einfach ein B-Feld an. Okay, jetzt wollen wir uns mal noch den relativistischen Fall der Landauniveaus anschauen. Auch hier rechnen Sie bitte in 2 Dimensionen, das B-Feld zeigt in z-Richtung. Berechnen Sie das Spektrum! \\

I: Okay, also ersetze ich im Dirac-Hamiltonian erstmal die Matrizen durch Paulimatrizen und führe die minimale Kopplung ein und quadrierte den Hamiltonian (da man ja irgendwas quadratisches braucht um eine HO-Struktur zu bekommen): $H = (c\sigma_x \Pi_x + c\sigma_y \Pi_y + mc^2 \sigma_z)^2$. Ausquadrieren liefert 9 Terme, verwende $\sigma_i^2 = 1$ und $[\sigma_i, \sigma_j] = 2i\epsilon_{ijk} \sigma_k$, damit bekommen Mischterme ein verschiedenes Vorzeichen und vom nicht-relativistischen HO verwende $[\Pi_x, \Pi_y] \propto i\hbar B$. Dann erhält man zum Schluss $H = c^2 \Pi_x^2 + c^2 \Pi_y^2 + \text{const.}$ und es gilt das gleiche Argument wie im nicht-relativistischen Fall mit dem Kommutator der quadrierten Größen, daher wird das Spektrum $E^2 = \hbar^2 \omega^2 (n+1/2) + \text{const.}$ sein. (Ich hab mich bei der Rechnung mehrfach mit Vorzeichen verhaspelt und beim Spektrum die Quadrate von $\hbar \omega$ vergessen, aber das war anscheinend nicht schlimm, er wollte eher sehen, wie ich beim Rechnen argumentiere und hat sich nicht beschwert, als ich großzügig meine Vorzeichen überarbeitet habe) \\

S: Okay, jetzt noch statistische Physik. Es gibt eine Größe, die Energiefluktuationen beschreibt. Welche ist das? \\

I: Das ist die spezifische Wärmekapazität. \\

S: Zeigen Sie mir das für ein kanonisches Ensemble! \\

I: Okay... Also das kanonische Ensemble lässt ja Energiefluktuationen zu... Und die spezifische Wärme ist ja gegeben durch $c = \frac{\partial U}{\partial T}$ oder ich könnte das auch über die Freie Energie ausrechnen... (Versuche Zeit zu gewinnen, da ich kein Plan habe, wie ich das zeigen soll) \\

S: Nein, bleiben Sie bei dieser Definition, sonst wird ihre Rechnung umständlicher. Wie berechnet man denn einen Energieerwartungswert? \\

I: Schreibe $\langle E \rangle = \sum_n p_n E_n$ an die Tafel. \\

S: Und wie sind die Wahrscheinlichkeiten gegeben? \\

I: In einem kanonischen Ensemble mit $p_n = \frac{1}{Z} \exp(-\beta E_n)$. Aaah, okay jetzt kann ich das ja einsetzen! Setze die zwei Formeln ineinander ein und schaue kurz ratlos, dann ziemlich entsetzt und sage etwas mutlos: jetzt muss ich das ja nach T ableiten (und versuche mich daran zu erinnern wie die Zustandssumme von der Temperatur abhängt). \\

S: Richtig, was ist hier denn alles T-anhängig? \\

I: Die Zustandssumme und natürlich hier dieses $\beta = \frac{1}{k_B T}$. \\

S: Ja. Wie berechnet man den die Zustandssumme? \\

I: Ähm... also das ist sollte ja die Spur über alle Zustandskonfigurationen sein... endlich dann der Geistesblitz, und schreibe $Z = \sum_n \exp(-\beta E_n)$ hin. \\

S: Okay, Sie wollten ja nach T ableiten... lassen Sie doch bitte k_B weg, das kann man ja wieder über Dimensionsbetrachtungen einfügen. \\

I: Schreibe $\frac{\partial Z}{\partial T} = \sum_n (-\frac{E_n}{T^2}) \exp(-\beta E_n)$ an die Tafel, und beginne dann direkt mit der verketteten Ableitung von p_n . Dabei mache ich den Fehler, das abgeleitete Z in p_n in den Zähler zu schreiben. \\

S: Schauen Sie sich nochmal ihre Definition von p_n an, da steht ja $1/Z$ - halt, nicht wegwischen - was müssen Sie denn jetzt einfach nur verändern? \\

I: Starre das Buchstabenchaos an. Jetzt folgen 3 Minuten Prüfung, nach denen ich so verwirrt bin, dass ich Schmalian schließlich nicht mehr sagen kann, was $\frac{d}{dT} \frac{1}{Z(T)}$ ist und er mir schließlich $\frac{1}{Z^2} \cdot \frac{dZ}{dT}$ diktiert. Etwas peinlich berührt schaue ich meine Rechnung nochmal an und korrigiere auf $c = \frac{1}{Z} \sum_n (-E_n^2/T) \exp(-\beta E_n) - \frac{1}{Z^2} (\sum_n (-E_n/T) \exp(-\beta E_n)) (\sum_{n'} (-E_{n'}/T) \exp(-\beta E_{n'})) = \frac{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2}{T^2}$.

S: Okay, gut. Dieses Ergebnis bereitet uns ja dann doch etwas Kopfschmerzen, denn c beschreibt ja die Energiefluktuationen und die würden ja im thermodynamischen Limes gegen unendlich gehen. Damit ist die Wärmekapazität ja keine sinnvolle Messgröße um Aussagen über das System zu treffen. Wie kann das sein?

I: (hatte keine Ahnung was er von mir will) Erkenne nach ein paar Sekunden zumindest das Problem: c ist extensiv ($c = \frac{dU}{dT}$) da die (innere) Energie extensiv ist und diese geht quadratisch ein.

S: Führen Sie die dimensionslosen Größen $c' = c/N$ und $\Delta E' = \Delta E/N = \frac{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2}{N}$ ein und berechnen Sie mir die Fluktuationen pro Energie!

I: $\frac{\langle \Delta E \rangle^2}{E} = \frac{\langle \sqrt{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2} \rangle^2}{E} = \frac{\langle c' \cdot N \rangle^2}{E' \cdot N} \rightarrow 0$ Also verschwinden die Fluktuationen im thermodynamischen Limes.

S: Okay, gehen Sie bitte kurz raus. Kommentar zur Benotung: Ich hätte ein sehr gutes Verständnis und könnte die Zusammenhänge sehr anschaulich erklären, außerdem könnte ich mal abgesehen davon, dass ich die Ableitung von $1/x$ nicht kenne, gut und flüssig rechnen.