

**Systematische Studie der Peakextraktion
neutraler Pionen in pp-Kollisionen bei
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ mit Hilfe von Templates**

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Marvin Hemmer

am Institut für Kernphysik

dem Fachbereich Physik

der Goethe Universität Frankfurt am Main

Februar 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
1.1	Standardmodell der Elementarteilchenphysik	2
1.2	Starke Wechselwirkung und das Quark-Gluon-Plasma	3
1.3	Messung neutraler Pionen zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasma	5
2	Experimenteller Aufbau	6
2.1	ALICE	7
2.2	elektromagnetische Kalorimeter EMCal	7
3	Analyse	10
3.1	Datenauswahl	10
3.1.1	Datensatz	10
3.1.2	Clusterauswahlkriterien	10
3.2	Rekonstruktion neutraler Pionen	10
3.3	Abschätzung des unkorrelierten Untergrunds	10
3.4	Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Funktionen	10
3.4.1	Abschätzung des korrelierten Untergrunds	10
3.5	Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Templates	10
3.5.1	Template des Signals	10
3.5.2	Template des korrelierten Untergrunds	10
3.5.3	Parametrisierungsmethode	10
3.5.4	Abzug des korrelierten Untergrunds und Integration des Signals	10
4	Korrigierter Yield	10
4.1	Korrekturen	10
4.2	Systematische Unsicherheit	10
5	Zusammenfassung und Ausblick	10

Einleitung

1 Theoretische Grundlagen

Theorien dienen nicht nur zur Beschreibung physikalischer Phänomene, sondern helfen auch das bekannte Wissen zu strukturieren. In der Elementarteilchenphysik ist die gängigste Theorie das sogenannte Standardmodell der Elementarteilchenphysik, auf welches im Folgenden näher eingegangen wird.

1.1 Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik unterteilt die sogenannten Elementarteilchen in zwei Gruppen, die sogenannten Quarks und die sogenannten Leptonen. Als Elementarteilchen werden alle Teilchen bezeichnet, die nicht weiter teilbar sind. Beide Gruppe beinhalten nach aktuellem Wissensstand jeweils sechs Teilchen, die sechs Quarks, *up* (u), *down* (d), *strange* (s), *charm* (c), *bottom* (b) und *top* (t) und die sechs Leptonen, Elektron (e), Elektron-Neutrino (ν_e), Myon (μ), Myon-Neutrino (ν_μ), Tau (τ) und Tau-Neutrino (ν_τ). In Tabelle 1 sind die Elementarteilchen bezüglich ihrer sogenannten Generation und ihrer elektrischen Ladung sortiert aufgelistet. Die Aufteilung in die Generationen erfolgt nach der Masse der Elementarteilchen. Die erste Generation besteht aus den leichtesten Elementarteilchen, die dritte Generation hingegen aus den schwersten Elementarteilchen. Die Generationen der Leptonen und Quarks sind dabei unabhängig voneinander. Zu jedem Elementarteilchen existiert ein entsprechendes Antiteilchen, mit entgegengesetzten Ladungen.

Generation	I	II	III	el. Ladung [e]
Quarks	up (u)	charm (c)	top (t)	+2/3
	down (d)	strange (s)	bottom (b)	-1/3
Leptonen	Elektron (e)	Myon (μ)	Tau (τ)	-1
	Elektron-Neutrino (ν_e)	Myon-Neutrino (ν_μ)	Tau-Neutrino (ν_τ)	0

Tabelle 1: Elementarteilchen geordnet nach ihrer Generation und ihrer elektrische Ladung

Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt es drei unterschiedliche Ladungen, die elektrische Ladung, die starke Ladung und die schwache Ladung. Jede dieser Ladungen lässt sich einer sogenannten Wechselwirkung zuordnen. Die drei Wechselwirkungen innerhalb des Standardmodells sind die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung und die schwache

Wechselwirkung. Die Werte der Ladungen bestimmen, wie stark ein Teilchen durch die entsprechenden Wechselwirkungen beeinflusst wird. Die Kraft, die ein geladenes Teilchen auf ein anderes, gleichartig geladenes Teilchen ausübt, wird so durch Wechselwirkungen vermittelt. Man kann auch sagen, dass die Kraft, beziehungsweise die Wechselwirkung an ein geladenes Teilchen koppelt. Wechselwirkungen beschreiben, neben der Kraft von einem Teilchen auf ein anders Teilchen, aber auch Zerfälle oder Annihilationen von Teilchen.

Kräfte zwischen zwei Teilchen werden durch das Austauschen von einem sogenannten Austauscheteilchen vermittelt. Zu den bekannten Austauscheteilchen gehören das Photon (γ), das Gluon (g), das Z-Boson und die W-Bosonen (Z^0 & W^\pm). Tabelle 2 zeigt die Zuordnung der Austauscheteilchen zu ihrer entsprechende Wechselwirkung. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf Quarks, Gluonen und die Ladung der starken Wechselwirkung eingegangen.

Wechselwirkung	elektromagnetisch	stark	schwach
Austauschteilchen	Photon (γ)	Gluon (g)	W^\pm , Z^0 - Bosonen

Tabelle 2: Austauscheteilchen der entsprechende Wechselwirkung zugeordnet

1.2 Starke Wechselwirkung und das Quark-Gluon-Plasma

Die Ladung der starken Wechselwirkung wird allgemein als Farbladung bezeichnet. Farbladung hat drei mögliche “Werte”: rot, blau und grün. Dabei spielt der “Wert“ der Farbladung für die Stärke der starken Wechselwirkung keine Rolle. Zusätzlich zu den drei Farbladungen gibt es auch drei Antifarben. Die drei Antifarben sind entsprechend antirot, antiblau und antigrün. Die Kombination der drei (Anti)Farben, oder die Kombination Farbe mit passender Antifarbe ergibt weiß, angelehnt an die Farblehre. Weiße Teilchen entsprechen nach außen hin farblosen Teilchen, auch wenn sie aus farbgeladenen Teilchen aufgebaut sind. Die Farbladung gibt keine Information über die tatsächliche Farbe der Teilchen. Quarks und Gluonen tragen jeweils Farbladung. Dadurch können sowohl Quarks auch auch Gluonen an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Unter anderem bindet die starke Wechselwirkung Quarks und Gluonen zu anderen Teilchen. Teilchen einer solchen Bindung kann man unterteilen in sogenannte Baryonen (qqq) und Mesonen ($q\bar{q}$), sowie entsprechend Antiteilchen. Alle aus Quarks bestehenden Teilchen nennt man Hadronen. Die Gluonen sorgen als virtuelle Teilchen für einen ständigen Farbaustausch innerhalb von Hadronen. Hadronen selbst sind dabei immer farbneutral. In der Natur kommen nur farbneutrale Teilchen vor, es gibt keine freie

Farbladung. Dieses Phänomen ist das sogenannte *Confinement*. Um das *Confinement* besser zu verstehen muss man sich die Kraft, beziehungsweise das Potential, der starken Wechselwirkung genauer ansehen.

Die Kraft, die auf farbgeladene Teilchen wirkt, folgt aus einem Potential $V(r)$. Dieses $V(r)$ besitzt einen anziehenden Teil und einen abstoßenden Teil. Der anziehende Teil weist dabei eine Proportionalität zum Abstand r zweier farbgeladener Teilchen auf, während der abstoßende Teil eine Antiproportionalität zu r aufweist. Der abstoßende Teil ist zusätzlich proportional zur sogenannten Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung α_s . Es gilt:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr \quad (1)$$

Für große r wird der anziehende Teil also immer stärker. Will man also zwei farbgeladene Teilchen wie etwa ein Quark-Antiquark-Paar von einander trennen, so müsste man immer mehr Energie aufwenden, je weiter man die Teilchen von einander entfernt. Ab einem bestimmten Punkt wird die benötigte Energie so groß, dass sie ausreicht ein weiteres Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Diese Erzeugung eines neuen Quark-Antiquark-Paares findet immer statt sobald sie möglich ist. Deshalb sind Quarks und Gluonen nicht direkt einzeln messbar, was die Untersuchung von Quarks, Gluonen und der starken Wechselwirkung erschwert. Um zu erklären, wie die starke Wechselwirkung, Quarks und Gluonen trotzdem untersucht werden können muss man sich α_s genauer anschauen.

Anders als die Bezeichnung vermuten lässt ist die Kopplungskonstante nicht konstant. Stattdessen hängt α_s vom sogenannten Impulsübertragsquadrat Q^2 zwischen zwei Teilchen ab. Abbildung ?? [BILD] zeigt den Verlauf von α_s in Abhängigkeit von Q^2 . Das Impulsübertragsquadrat Q^2 , bzw. der Impulsübertrag Q hängt dabei selbst über die De-Broglie-Wellenlänge mit dem Abstand r zusammen. Es gilt $Q = \frac{h}{\lambda}$, wobei λ die räumliche Auflösung beschreibt. Für eine genau Auflösung, also für sehr kleine r muss Q und damit auch Q^2 groß sein. α_s hängt also antiproportional von r ab. Aufgrund dieses Zusammenhangs nennt man α_s auch *running α_s* . Den Zustand für sehr kleine α_s nennt man asymptotische Freiheit, da sich innerhalb dieses Zustands Quarks und Gluonen quasi frei bewegen können. Um so einen Zustand erzeugen zu können braucht man eine hohe Dichte von Quarks und Gluonen oder eine hohe Temperatur. Eine verbreitete theoretische Beschreibung eines Mediums in diesem heißen und dichten Zustand ist das sogenannte Quark-Gluon-Plasma, kurz QGP.

Ein heißer und dichter Zustand entsteht kurz nach der Kollision von zwei hochenergetischen Atomkernen. Quarks und Gluonen, die aus diesem Medium kommen, müssen, während der sogenannten Hadronisierung, wieder zu Hadronen werden. Diese Hadronen können zerfallen, insofern sie keine stabilen Teilchen sind. Es kann auch zu ganzen Zerfallsketten kommen, bis die Endteilchen nicht mehr zerfallen. Je nach dem, wie schnell Teilchen zerfallen, können entweder diese oder ihre Zerfallsprodukte gemessen werden und liefern indirekt Aufschluss auf Eigenschaften des heißen und dichten Zustands.

1.3 Messung neutraler Pionen zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasma

Das neutrale Pion (π^0) ist ein Meson und besteht also aus einem Quark-Antiquark-Paar. Genauer lässt sich das π^0 als eine Überlagerung zweier quantenmechanischer Zustände beschreiben:

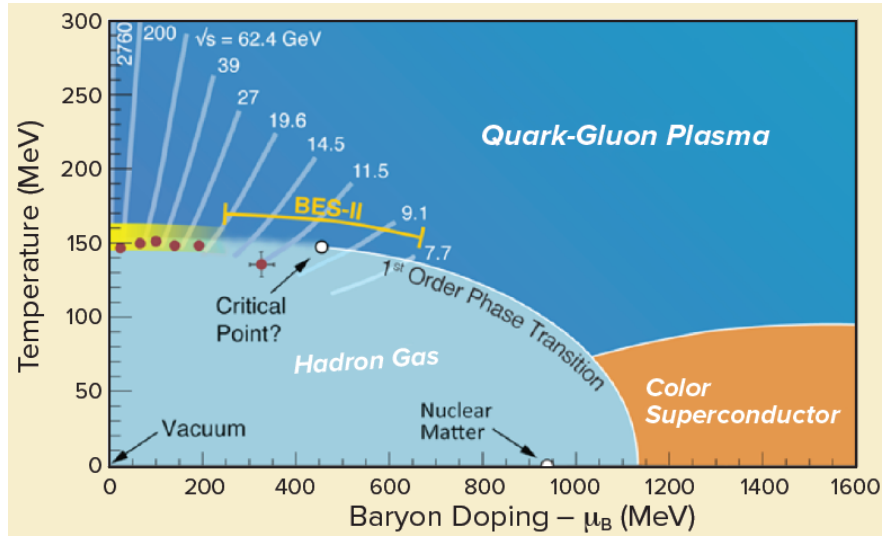


Abbildung 1: Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie in Abhängigkeit der Baryonendichte μ_B und der Temperatur T . [<https://arxiv.org/abs/1609.03104>]

2 Experimenteller Aufbau

Bei der Erforschung des heißen und dichten Mediums beziehungsweise der Suche nach dem QGP spielt das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie eine wichtige Rolle. Abbildung 1 skizziert ein Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie in Abhängigkeit der Baryonendichte μ_B und der Temperatur T . Bei geringer Baryonendichte und niedriger Temperatur, wie etwa Raumtemperatur, sind alle Quarks und Gluonen in Hadronen gebunden. Erhöht man die Temperatur, oder beide Größen, stark wird ein Übergang in das QGP erwartet, in welchem sich die Quarks und Gluonen quasi frei bewegen können. Außerdem muss die Energiedichte groß genug sein um ein QGP erzeugen zu können, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich dieses nur bei Kernkollisionen ausbilden kann. Proton-Proton-Kollisionen werden als Referenzmessungen benutzt.

In der Abbildung sind zusätzlich verschiedene Schwerpunktsenergien \sqrt{s} eingezeichnet. Die Schwerpunktsenergie eines Kollisionsexperiments gibt an, wie viel Energie dem System bei der Kollision zur Verfügung steht. Entsprechend hängt \sqrt{s} von der Energie der kollidierenden Teilchen oder Kerne ab. Für Kollisionsexperimente zweier identischer Teilchen oder Kerne mit gleicher Energie E gilt:

$$\sqrt{s} = 2E \quad (2)$$

Unterschiedliche \sqrt{s} liefern also Daten aus unterschiedlichen Bereichen des Phasendiagramms. Um

die Bereiche des Phasendiagramms innerhalb des QGP und dem Übergang zwischen quasi freien zu gebundenen Quarks und Gluonen untersuchen zu können, werden also Kollisionen mit ausreichenden Schwerpunktsenergieen benötigt.

Um die benötigten Schwerpunktsenergieen erreichen zu können, müssen die Teilchen beziehungsweise Kerne auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Die Beschleunigung geschieht in Beschleunigerringen, wo die Teilchen oder Kerne durch Dipolmagnete auf einer Kreisbahn gehalten und durch elektrische Felder beschleunigt werden. Der LHC, der weltweit größte Beschleunigerring, gehört zu CERN und erreicht aktuell Schwerpunktsenergieen bis $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$. Im LHC Ring befinden sich vier Punkte an denen Kollisionen stattfinden. An diesen vier befinden sich umfangreiche Detektorkomplexe, wie etwa der ALICE Detektor. Im folgenden Abschnitt wird das ALICE Experiment genauer beschrieben.

2.1 ALICE

Das ALICE Experiment wurde speziell zur Untersuchung des Quark-Gluonen-Plasmas gebaut. Um die Ansprüche dafür besonders gut erfüllen zu können besteht das ALICE Experiment aus einer Vielzahl unterschiedlicher Detektoren.

2.2 elektromagnetische Kalorimeter EMCal

Der Hauptdetektor dieser Analyse ist das elektromagnetische Kalorimeter, kurz EMCal. In einem Abstand von 4,5m vom Vertex deckt das EMCal einen Azimutalwinkelbereich von $\phi = 107^\circ$ und einen Rapiditätsbereich von $|\eta| \leq 0,7$ ab. Aufgrund von Detektormaterial oder Trägerstrukturen zwischen dem Vertex und dem EMCal können Teilchen abgelenkt werden oder Photonen in ein Elektron-Positron-Paar konvertieren. Die Konvertierung von Photonen ist besonders zu beachten, da in dieser Analyse π^0 , welche in zwei Photonen zerfallen, rekonstruiert werden.

Das EMCal besteht aus zwölf sogenannten Supermodulen, zehn normal große und zwei Eindrittel große. Ein normal großes Supermodul unterteilt sich in 24 sogenannte Streifenmodule, welche wiederum aus 12 Modulen zusammengesetzt sind. Jedes Modul beinhaltet 4 Zellen, womit das EMCal aus insgesamt 12288 Zellen besteht. Die Zellen sind für das Detektieren und Messen der Energie von hauptsächlich Photonen, Elektronen und Positronen verantwortlich. Dafür besteht eine einzelne Zelle aus abwechselnd 77 Szintillatoren- und 76 Bleischichten. In den Bleischichten entstehen sogenannten elektromagnetische Schauer, indem eintreffende Photonen durch Paarerzeugung

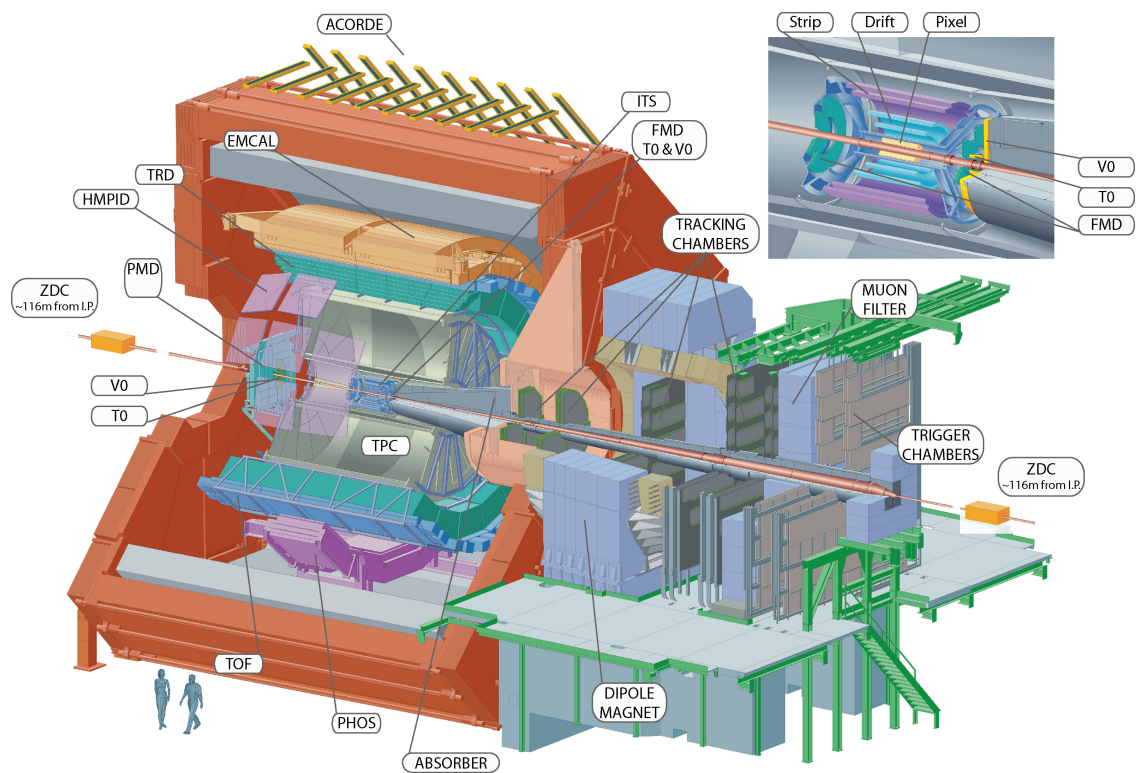


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Clusters. Die Ellipsenhalbachsen M20 und M02 definieren eine Ellipse, welche alle orange markierten Zellen, die zu einem Cluster gehören, umfasst. [https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE_experiment]

gung in ein Elektron und ein Positron zerfallen, welche wiederum durch Bremsstrahlung weitere Photonen abstrahlen. Die Szintillatoren wandeln die hochenergetischen Photonen in ein messbares Lichtsignal. Alle Szintillatorschichten einer Zelle sind über ein Glasfaserkabel mit einem Photomultiplier verbunden. Der Photomultiplier wandelt das Lichtsignal in ein elektrisches Signal, welches proportional zu gespeicherten Energie der Zelle ist.

Jeder elektromagnetischer Schauer besitzt eine gewisse Ausdehnung, welche über den sogenannten Molière-Radius R_M definiert ist. Der Molière-Radius gibt den Radius passend zu einem Zylinder an, in welchem 90% der gesamten Energie eines Schauers vom Detektor absorbiert wurde. Für das EMCal beträgt der Molière-Radius $R_M = 3,7\text{cm}$, womit sich eine Kreisfläche von ca. 43cm^2 ergibt. Die einzelnen Zellen des EMCal hingegen haben eine quadratische Fläche von 36cm^2 . Der Schauer eines einzelnen Teilchens erstreckt sich also über mehrere Zellen, weshalb mehrere Zellen durch eine Algorithmus zu sogenannten *Clustern* zusammengefasst werden. Algorithmen zur Rekonstruktion von Clustern heißen *Clusterizer*. In der hier vorliegenden Analyse wird der sogenannte *v2-Clusterizer* verwendet. Dieser sucht zunächst nach der Zelle mit der größten deponierten Energie, welche noch keinem Cluster angehört und eine gewisse Schwellenenergie besitzt. Von dieser Startzelle ausgehend werden die Nachbarzellen abgesucht und zum Cluster hinzugefügt, wenn sie eine gewisse Mindestenergie überschreiten und ebenfalls keinem weiteren Cluster zugeordnet sind. Dies Suche nach Nachbarzellen geschieht dabei iterativ solange, bis keine Nachbarzellen die nötigen Kriterien erfüllen um dem Cluster hinzugefügt zu werden. Anschließend wird eine neue Startzelle für ein neues Cluster gesucht und der Prozess beginnt von vorne.

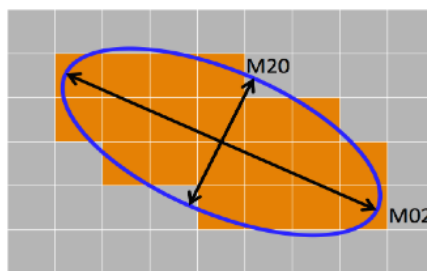


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Clusters. Die Ellipsenhalbachsen M20 und M02 definieren eine Ellipse, welche alle orange markierten Zellen, die zu einem Cluster gehören, umfasst. [Masterarbeit Adrian oder bearbeiten]

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung eines Clusters. Alle orange eingefärbten Zellen gehören dabei zu einem Cluster. Die eingezeichnete Ellipse, beziehungsweise ihre Halbachsen M02 und M20, helfen dabei das Cluster zu parametrisieren. Die Form eines Clusters und damit die Größe

von M02 und M20 unterscheiden sich Abhängig, ob das Cluster durch ein Hadron entstanden ist oder nicht. Dadurch kann M02 benutzt werden um Photonenkandidaten zu identifizieren. Für M02 gilt:

$$M_{02} = \frac{1}{2} \sum_i E_i (x_i^2 + y_i^2) + \sqrt{\frac{1}{4} \sum_i (x_i^2 + y_i^2)^2 + \left(\sum_i E_i x_i y_i \right)^2} \quad (3)$$

Wobei E_i für die Energie einer Zelle und x_i und y_i für die relative Position einer Zelle zur Startzelle steht.

3 Analyse

3.1 Datenauswahl

3.1.1 Datensatz

3.1.2 Clusterauswahlkriterien

3.2 Rekonstruktion neutraler Pionen

3.3 Abschätzung des unkorrelierten Untergrunds

3.4 Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Funktionen

3.4.1 Abschätzung des korrelierten Untergrunds

3.5 Peak Extraktion mit Hilfe von Parametrisierungen von Templates

3.5.1 Template des Signals

3.5.2 Template des korrelierten Untergrunds

3.5.3 Parametrisierungsmethode

3.5.4 Abzug des korrelierten Untergrunds und Integration des Signals

4 Korrigierter Yield

4.1 Korrekturen

4.2 Systematische Unsicherheit

5 Zusammenfassung und Ausblick