

Diese Arbeit diskutiert wichtige Fragestellungen der Strahldynamik im Proton-Blei-Betrieb im Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf. In zwei mehrwöchigen Zeitblöcken in den Jahren 2013 und 2016 konnten bisher erfolgreich Proton-Blei-Kollisionen im LHC erzeugt und von den Experimenten am LHC genutzt werden. Grund für den Zweifel an dem erfolgreichen Betrieb in Proton-Blei-Konfiguration war die Tatsache, dass die Strahlen mit unterschiedlichen Umlauffrequenzen beschleunigt werden müssen. Es kommt zu einer langreichweitigen Abstoßung zwischen den Strahlen, da sich beide Strahlen um die Wechselwirkungspunkte die Strahlkammer teilen. Aufgrund der unterschiedlichen Umlauffrequenzen verschieben sich die Positionen der Wechselwirkung zwischen den Strahlen jeden Umlauf. Dies kann zu resonanter Anregung und zum Anwachsen der transversalen Strahlemittanz führen, wie es im Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) beobachtet wurde. In dieser Arbeit werden Simulationen für den LHC, den RHIC und den High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) mit einem neuem Modell durchgeführt. Die Ergebnisse für den RHIC zeigen relative Anwachsraten der Emittanzen des Goldstrahls im Gold-Deuteron-Betrieb im RHIC von 0.1 %/s bis 1.5 %/s. Anwachsraten dieser Größenordnung wurden im RHIC experimentell beobachtet. Simulationen für den LHC zeigen keinen nennenswerten Emittanzzuwachs des Bleistrahls für unterschiedliche Intensitäten des gegenläufigen Strahls. Die Simulationsergebnisse bestätigen die gemessene Stabilität der Strahlen im LHC und die Problematik stark anwachsender Emittanzen im RHIC wird reproduziert. Ebenfalls wird kein signifikanter Emittanzzuwachs für den Future Circular Collider (FCC) und den HL-LHC vorhergesagt.

Mit Hilfe einer Frequency-Map-Analyse wird in dieser Arbeit überprüft, ob die Wechselwirkung des Bleistrahls mit dem viel kleineren Protonenstrahl im Proton-Blei-Betrieb des LHCs zu Diffusion innerhalb des Bleistrahls führt. Erfahrungen bei HERA am DESY in Hamburg und beim SppS am CERN haben gezeigt, dass die Lebensdauer des größeren Strahls unter Umständen rapide abnehmen kann. Die Ergebnisse der Simulation zeigen keine chaotische Dynamik nahe des Strahlzentrums des Bleistrahls. Dieses Ergebnis werden durch experimentelle Beobachtung gestützt.

Ein Programmcode wurde entwickelt, der die Strahlentwicklung im LHC mittels gekoppelter Differentialgleichungen berechnet. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Anwachsraten des Bleistrahls durch Intra-Beam-Scattering überschätzt werden und dass Teilchenpakete des Bleistrahls mehr Intensität verlieren als im Modell angenommen. Die Analyse zeigt außerdem, dass Teilchenpakete, die in einem Detektor kollidieren, zusätzliche Verluste erleiden, die mit abnehmendem Kreuzungswinkel im Kollisionspunkt zunehmen.

In dieser Arbeit werden die Daten von Strahlverlustmonitoren in Kombination mit der Luminosität und der Verlustrate der Strahlintensität aus dem Jahre 2016 genutzt, um den Wirkungsquerschnitt von Proton-Blei-Kollisionen bei der Schwerpunktsenergie von 8.16 TeV zu bestimmen. Strahlverlustmonitore, die hauptsächlich Strahlverluste detektieren, die nicht durch den Kollisionsprozess selbst hervorgerufen werden, werden genutzt um den Gesamtwirkungsquerschnitt via Regression zu bestimmen. Eine Analyse der in 2016 bei der Schwerpunktsenergie von 8.16 TeV aufgenommenen Daten ergab einen Gesamtwirkungsquerschnitt von $\sigma = (2.32 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.20(\text{sys.}))$ b. Dies entspricht in etwa einem hadronischen Wirkungsquerschnitt von $\sigma(\text{had}) = (2.24 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.21(\text{sys.}))$ b. Dieser Wert weicht nur um 5.7 % von dem theoretischen Wert $\sigma(\text{had}) = (2.12 \pm 0.01)$ b ab.

Der Simulationscode zur Bestimmung der Strahlentwicklung wird auch genutzt, um die integrierte Luminosität eines zukünftigen einmonatigen Betriebes mit Proton-Blei-Kollisionen abzuschätzen. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass in der Zukunft die Luminosität in den Experimenten ATLAS und CMS von 15/nb pro Tag in 2016 auf 30/nb pro Tag anwachsen wird, was eine deutliche Leistungssteigerung ist. Der Einsatz der TCL-Kollimatoren ist jedoch nötig um die dispersionunterdrückenden Regionen bei ATLAS und CMS gegen Kollisionsfragmente zu schützen.

Auch gibt diese Arbeit einen Ausblick der zu erwartenden Luminositätsproduktion im Proton-Nukleus-Betrieb bei Verwendung von Ionenarten, die leichter sind als Bleionen. Ein Wechsel von Proton-Blei- zu Proton-Argon-Kollisionen würde beispielsweise die integrierte Luminosität innerhalb eines Monats von 0.8/nb auf 9.4/nb in ATLAS und CMS erhöhen. Dies ist eine Steigerung von einer Größenordnung und ungefähr eine Verdoppelung der integrierten Nukleon-Nukleon-Luminosität. Möglicherweise wird es 2023 testweise Betrieb mit Proton-Sauerstoff-Kollisionen

geben, der nur wenige Tage andauern und mit einer geringen Luminosität operiert werden wird. Das LHCf-Experiment (LHCb-Experiment) würde die angestrebte integrierte Luminosität von $1.5/\text{nb}$ ($2/\text{nb}$) innerhalb von 70h (35h) Strahlzeit erreichen.