

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur longitudinalen Phasenmodulation der Nachbeschleunigungsspannung im Hohlraumresonator des Speicherrings Delta konzipiert, entwickelt, aufgebaut, in Betrieb genommen und erprobt. Mit geeignet gewählten Betriebsparametern ermöglicht es jederzeit, die Anregung der longitudinalen Multibunchmoden unter die Nachweisschwelle zu senken. Dies gilt insbesondere auch für die bei hohen Strahlströmen in Delta besonders häufig stark angeregte longitudinale Multibunchmode CBM 54 (Coupled-Bunch-Mode 54). Erstmals existiert hiermit eine Lösung für das Problem der Anregung von Multibunchmoden bei hohen Strahlströmen im Speicherring Delta.

Die Phasenmodulation beeinflusst die longitudinale Elektronenverteilung innerhalb der Bunche. Optimale Ergebnisse konnten mit einer Modulationsfrequenz erzielt werden, die doppelt so groß ist, wie die Synchrotronfrequenz. Es wird ein sinusförmiges Modulationssignal verwendet, wodurch Dispersionseffekte in der Modulationssignalleitung entfallen. Die longitudinale Phasenlage der Nachbeschleunigungsspannung wird so moduliert, dass sich die Bunche synchron zu Modulations- und Synchrotronfrequenz periodisch aufweiten, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl durch Simulationsrechnungen, als auch durch Messungen nachgewiesen wurde. Die maximale Aufweitung und maximale Strahllebensdauer stellt sich bei einem Phasenhub von etwa  $3^\circ$  ein. Bei größerem Phasenhub tritt eine Aufteilung der Bunche in zwei Teilbunche auf, die longitudinal mit der Synchrotronfrequenz gegenphasig zueinander schwingen. Um möglichst wenig Elektronen durch Verlassen der Separatrix bei zu starker Aufteilung zu verlieren, wird der Phasenhub nicht höher als  $25^\circ$  gewählt. Der ohne Phasenmodulation nur geringfügig variierende Abstand zwischen den Elektronen benachbarter Bunche unterliegt nun einer deutlich verbreiterten Verteilung, die sich darüber hinaus stetig zeitlich ändert. Dadurch wird die, für die Anregung longitudinaler Multibunchmoden erforderliche, resonante Wechselwirkung zwischen den Schwingungen verschiedener Bunche entscheidend reduziert. Ab einem Phasenhub von etwa  $2^\circ$ – $3^\circ$  führt die Phasenmodulation zu einer Unterdrückung der longitudinalen Multibunchmoden.

Als Ursache der CBM 54-Anregung wurde bisher eine schmalbandige störende Resonanz im Speicherring außerhalb des zur Nachbeschleunigung verwendeten Hohlraumresonators angenommen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die CBM 54 durch die  $TE_{111}$ -Mode des Hohlraumresonators angeregt wird.

Neben der longitudinalen Strahlstabilisierung konnten mit der Phasenmodulation auch unerwünschte transversale Schwingungen unterdrückt werden, mit zusätzlichen positiven Nebeneffekten, insbesondere geringere Vakuumkammertemperatur und Vakuumdruckverbesserung. Bei Tests für ein Feedbacksystem, das die longitudinale Strahlstabilität regelungstechnisch verbessern soll, konnte gezeigt werden, dass das im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgebaute Phasenmodulationssystem geeignet ist, einen bereits injizierten Strahl soweit zu stabilisieren, dass das Feedbacksystem ohne vorherige Strahlstromreduzierung (neu) gestartet werden kann.

Der für den Standardnutzerbetrieb bedeutendste Effekt der Phasenmodulation ist die erzielte Verbesserung der Lebensdauer, wodurch gespeicherte Elektronen länger für die Erzeugung von Synchrotronstrahlung zur Verfügung stehen. Im Standardnutzerbetrieb mit SAW steigt die Lebensdauer mindestens um etwa eine Stunde, ohne SAW um etwa zwei bis drei Stunden an. Maßgeblich hierfür ist die Verringerung des Touschek-Effektes (Kapitel 3.3.1) durch die (aufgrund der im zeitlichen Mittel erhöhten Bunchlänge) verringerte effektive Elektronendichte innerhalb der Bunche. Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigen eine Erhöhung der Touschek-Lebensdauer von 60% während dem Einsatz der Phasenmodulation. Ein Phasenmodulationssystem ist im Gegensatz zu einem Landau-Cavity-System mit ebenfalls bunchverlängernder Wirkung (an Delta bereits untersucht [20]) ohne Eingriff in das Vakuumsystem nachrüst- und abschaltbar, wohingegen Landau-Cavities zur Außerbetriebnahme gezielt verstimmt werden müssten, was möglicherweise Auswirkungen auf andere Effekte hätte (z. B. höhere Moden der Landau-Cavities selbst), und dadurch entsprechende Temperaturstabilisierung und Dämpfung erforderlich machen würde.

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und realisierte Aufbau ermöglicht seit 2009 erfolgreich den zuverlässigen Einsatz der Phasenmodulation im Standardnutzerbetrieb unter Vermeidung unerwünschter Auswirkungen auf Messsysteme und Injektionskette und lässt sich für Sonderbetriebsformen wie FEL-Betrieb (Hier ist ein kurzer Bunch mit hoher Elektronendichte erforderlich, jede Bunchverlängerung also zu vermeiden.) jederzeit nachwirkungsfrei ausschalten. Die Lebensdauerverbesserung erhöht die Nutzbarkeit von Delta als Synchrotronstrahlungsquelle erheblich, da der Strahlstrom nach der Injektion langsamer sinkt und dadurch mehr Synchrotronstrahlung für Experimente verfügbar ist.