# 1.5 GHz Single-Mode-Cavity

## Einführung: Das Projekt-Team und die Funktion der Single-Mode-Cavity

**M. Bousonville, S. Karau,** P. Hülsmann (MHF)
**H. Bienert,** M. Pröll, M. Lemke (ZM1)
S. Vilcins (MDI)

Engineering Day, Hamburg, 20. Juni 2024

HELMHOLTZ RESEARCH FOR GRAND CHALLENGES

# Das Team

## In der jetzigen Projektphase

| | Rolle | Aufgabe |
|---|---|---|
| Peter Hülsmann | Projektleitung des Arbeitspakets „Radio Frequency System“ im PETRA IV Projekt, Initiator des Subprojekts. | Spokes person und Senior RF Designer. |
| Michael Bousonville | Sub-Projektleitung | Operatives Projektmanagement, Berichtswesen |
| Silke Vilcins | Technische Koordination | Fertigung und Qualitätssicherung, Terminplanung, Kostenplanung |
| Simon Karau | Junior RF Designer | Simulation und Optimierung der HF-Eigenschaften der Kavität, Toleranzstudien |
| Michele Pröll | Produkt-Designerin | 3D Modellierung, Erstellung der technischen Unterlagen |
| Hilmar Bienert | Senior-Konstrukteur | FEM Simulationen, Berechnungen und Auslegungen der Mechanik |

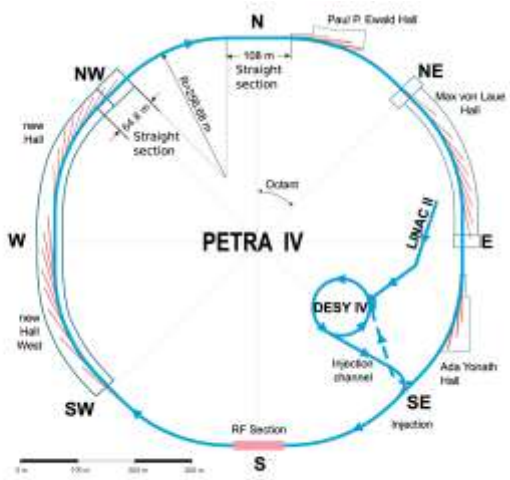
# Es gibt 2 Typen von Kavitäten in PETRA IV

## Als erstes betrachten wir die Grundharmonische 500 MHz Kavität

- Die Strahlenergie soll 6 GeV betragen.
- Auf der Kreisbahn verlieren die Elektronen in den
  - Ablenkmagneten,
  - Wigglern und
  - Undulatoren
- Energie.
- Pro Umlauf sind das 4 bis 5 MeV
- Dieser Verlust wird durch die 500 MHz Kavitäten kompensiert,
- in dem sie die Elektronen so stark beschleunigen, dass die Verluste ausgeglichen werden,
- und damit ihre Energie im Mittel bei 6 GeV stabil bleibt.

**Table 6.21.:** *Essential PETRA IV parameters for the RF system design.*

| Parameter | Brightness mode | Timing mode |
|---|---|---|
| Beam energy | 6 GeV | |
| Beam current | 200 mA | 80 mA |
| Number of bunches | 1600 (=80 x 20) | 80 (=80 x 1) |
| Bunch spacing | 4 ns | 96 ns |
| Bunch filling gap | 20 ns | 96 ns |
| Harmonic number | 3840 | |
| Revolution frequency | 130.121 kHz | |
| Energy loss per turn | 4.02 MeV | |
| in bending magnets | 1.32 MeV | |
| in insertion devices | 2.70 MeV | |
| Momentum compaction factor | $1.485 \times 10^{-5}$ | |




PETRA IV.

Upgrade of PETRA III to the Ultimate 3D X-ray Microscope
Conceptual Design Report

**Figure 6.1.:** *Layout of the PETRA IV facility.*

# Warum ein 3. Harmonisches System?

## Geht es auch ohne?

- In einen Synchrotron (wie PETRA IV) kann man ohne ein 3. Harmonisches System betreiben, wenn die Anzahl der Elektronen pro Bunch nicht zu groß wird.
- Bei einer größer werdender Anzahl von Elektronen pro Bunch, steigt die Elektronendichte und damit die Gefahr, das die Elektronen miteinander kollidieren.

  ⟹ Bei den Kollisionen verlieren die Elektronen Energie.

  ⟹ Dadurch wird die Elektronen-Strahlbündelung schlechter ⟶ Verschlechterung der Emittanz

  ⟹ Einige der Elektronen können nicht mehr im Bunch gehalten werden und fliegen aus der Umlaufbahn.

  ⟹ und dadurch nimmt die Bunch-Ladung ab.

- Die Elektronen-Ladung wird kleiner und die Strahlbündelung schlechter, bis zu einem Punkt, an dem der Elektronen-Bunch für die Lichterzeugung unbrauchbar wird.

  ⟹ Ende der Lebensdauer.

- Bei den in PETRA IV vorgesehenen Bunch-Ladungen beträgt diese Lebensdauer einigen Minuten.
- Man kann dann zwar Elektronen nachfüllen, jedes Nachfüllen stört aber die Strahlstabilität und damit die User.
  - Anmerkung: In PETRA III gibt es Betriebsmoden bei denen alle 30 Sekunden nachgefüllt werden muss.

# Warum ein 3. Harmonisches System?

## Was es bewirkt

- Mit den 3. harmonischen System wird der Bunch verlängert

  ⟹ Reduzierung der Elektronendichte

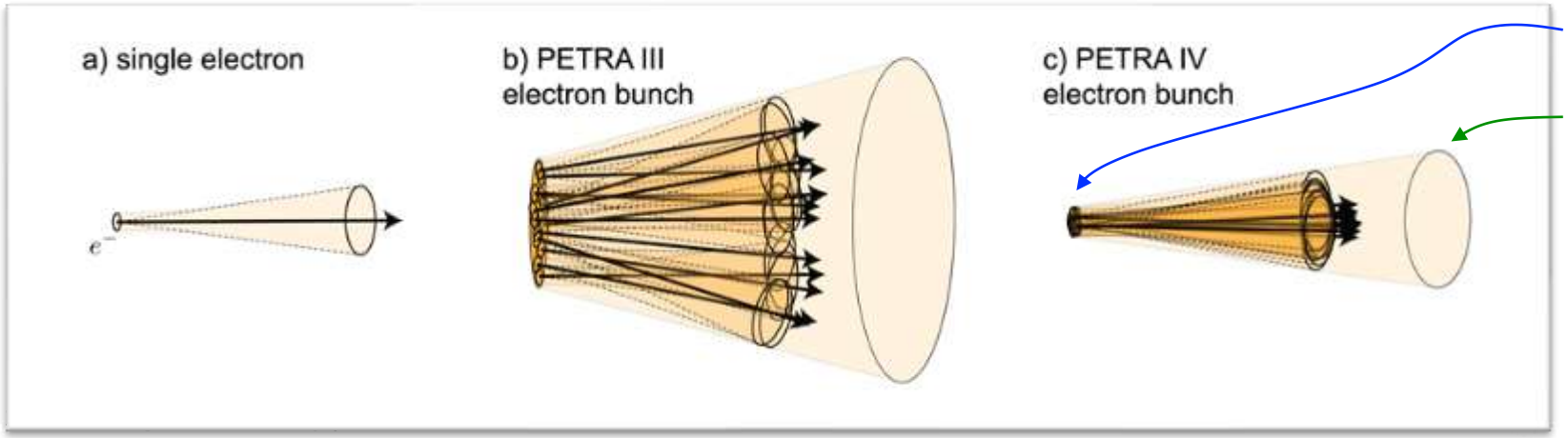
  ⟹ Weniger Elektronen-Kollisionen

  ⟹ Die transversale Strahlbündelung bleibt viel länger erhalten

  ⟹ Die Bunch-Ladung verringert sich viel langsamer

  ⟹ Die Lebensdauer wird von Minuten auf Stunden erhöht

- Störendes Nachfüllen entfällt – es wird erst nach einigen Stunden komplett neu befüllt.
- Dadurch verbessert sich insgesamt die Elektronen-Strahlqualität ⟹ und infolgedessen auch die Photonen-Strahlqualität




Durch die stärkere transversale Bündelung der Elektronen, werden auch die Photonen stärker gebündelt.

Stichwort: punktförmige Lichtquelle

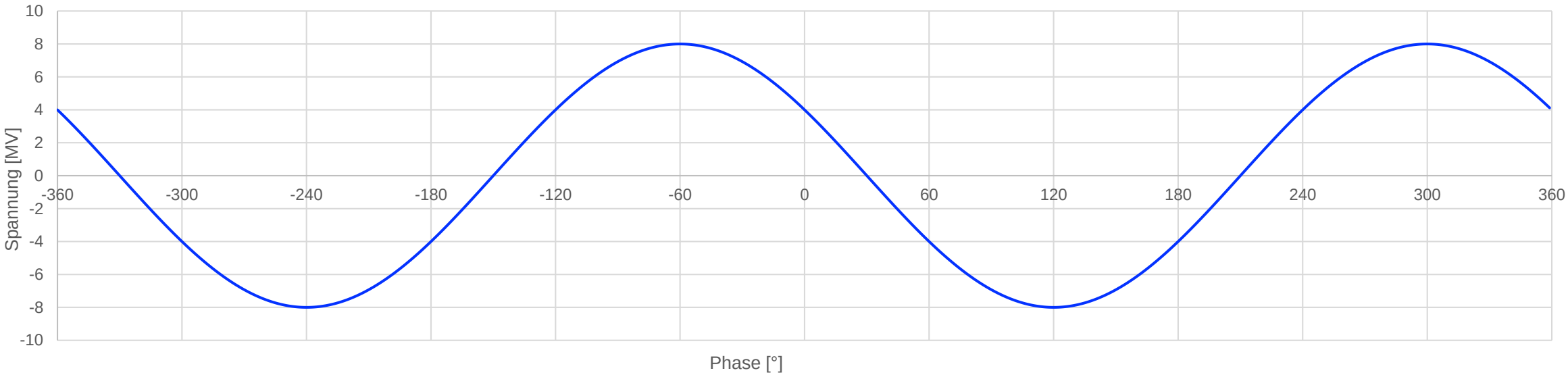
PETRA IV.
Upgrade of PETRA III to the Ultimate 3D X-ray Microscope
Conceptual Design Report

# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Als erstes betrachten wir das Gesamtsystem ohne das 3. harmonische System. Es wirken also nur die 500 MHz.

Ein Elektron, dass einmal durch alle 24 Kavitäten fliegt “sieht“ – abhängig vom Zeitpunkt des Durchflugs – eine Spannung zwischen +8 MV und -8 MV.



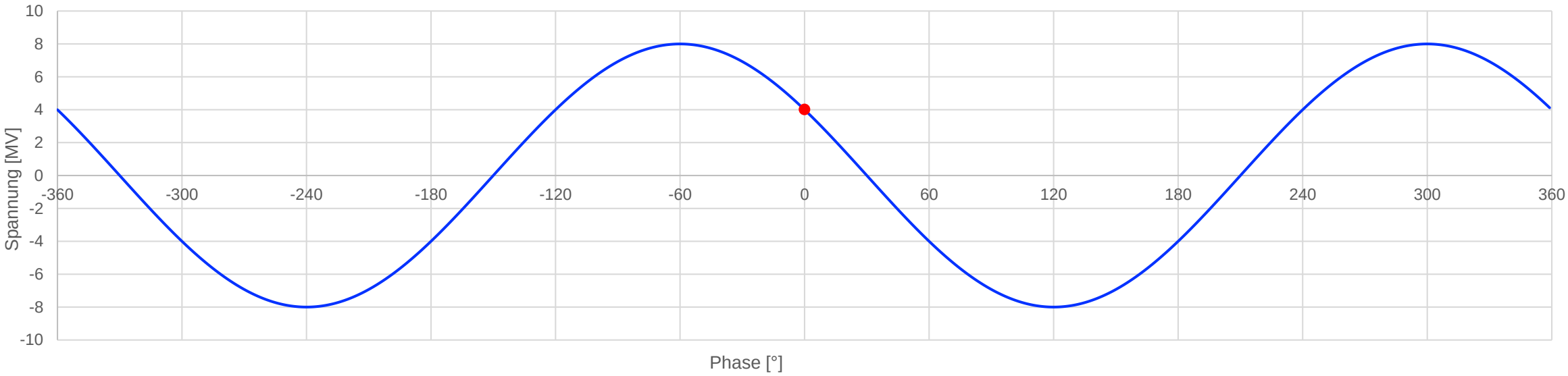
# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Das ideale Teilchen – auch Soll-Teilchen genannt – passiert bei der Phase = 0 die Kavität.

Dabei wirkt eine Beschleunigungsspannung von 4 MV auf das Elektron, d.h. der Energie-Verlust eines Umlaufs wird genau ausgeglichen.

Unter idealen Bedingungen könnte das Elektron nun ewig auf seiner Bahn kreisen.



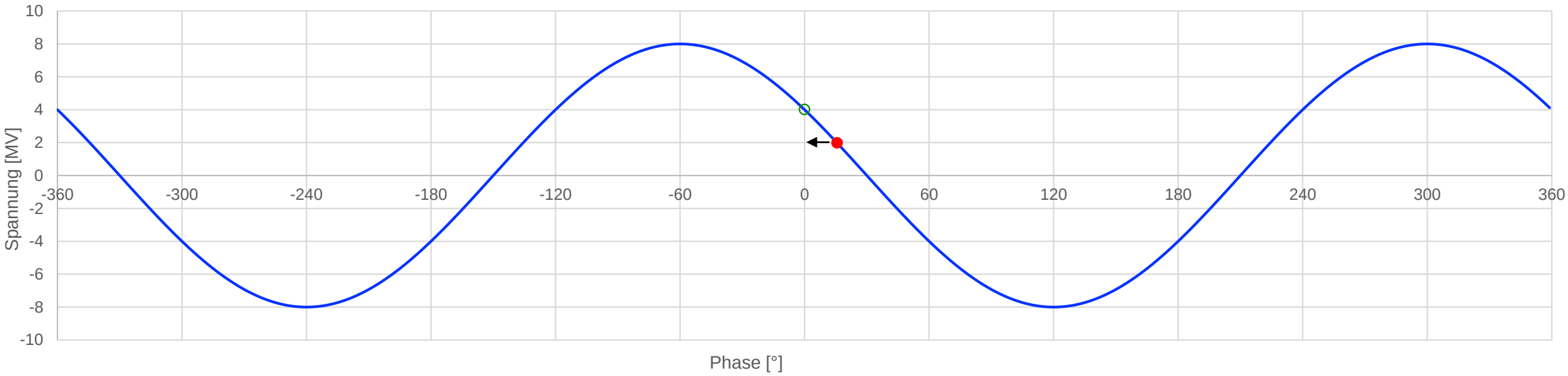
# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Das reale Teilchen weicht von der Sollposition ab.

Ist seine Energie zu hoch, dann kreiste es auf einer größeren Umlaufbahn und kommt zu spät an. Im Beispiel erfährt es dadurch 2 MV weniger Beschleunigerspannung als nötig wäre, um den Umlaufverlust von 4 MeV auszugleichen.

Die Energie des Elektrons nimmt dadurch ab und das Teilchen näher sich mit der Zeit wieder seiner Sollposition.



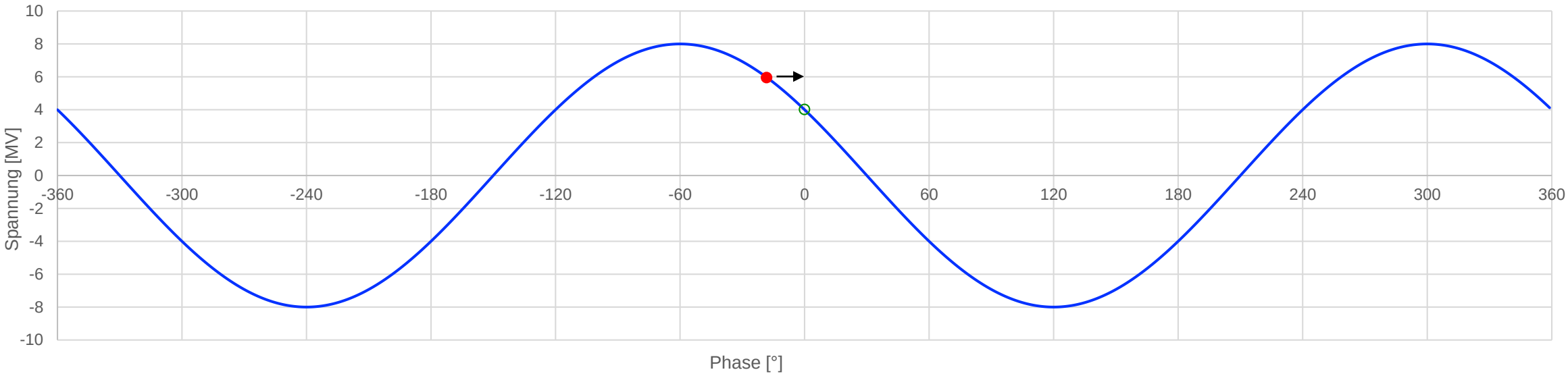
# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Ist die Elektronen-Energie zu klein, dann kreiste es auf einer kleineren Umlaufbahn und kommt zu früh an. Im Beispiel erfährt es dadurch 2 MV mehr Beschleunigerspannung als nötig wäre, um seinen Umlaufverlust von 4 MeV auszugleichen.

Die Energie des Elektrons nimmt zu und auch dieses Teilchen näher sich mit der Zeit wieder seiner Sollposition an.

Die Elektronen werden durch diesen Mechanismus immer wieder in Richtung Sollposition „geregelt“.



# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

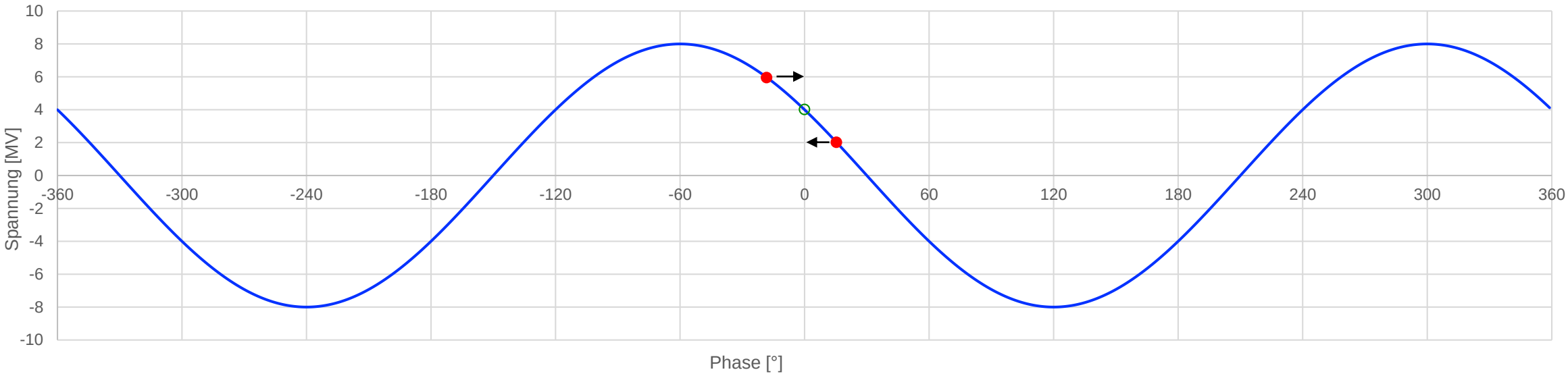
Die Elektronen oszillieren schließlich um die Sollphase. In Summe bilden sie eine Bündel, den Electron Bunch.

Man sieht das kleine Energieabweichungen zu großen „Regelhüben“ führen.

⟹ Starke Bündelung in Ausbreitungsrichtung ⟹ kurze Bunch-Länge

⟹ Viel Bewegung der Elektronen um die Sollphase

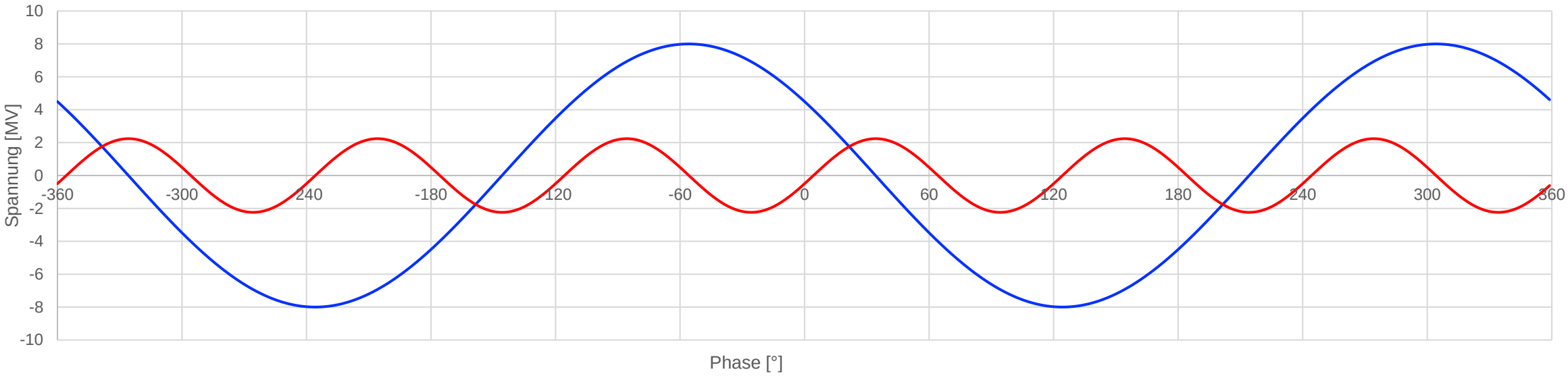
⟹ Mehr Elektronen-Kollisionen ⟹ Emittanz wird schnell größer und mehr Strahl geht verloren



# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Nun ergänzen wir das 3. harmonische System. ⟹ 24 zusätzliche Kavitäten mit 1.5 GHz



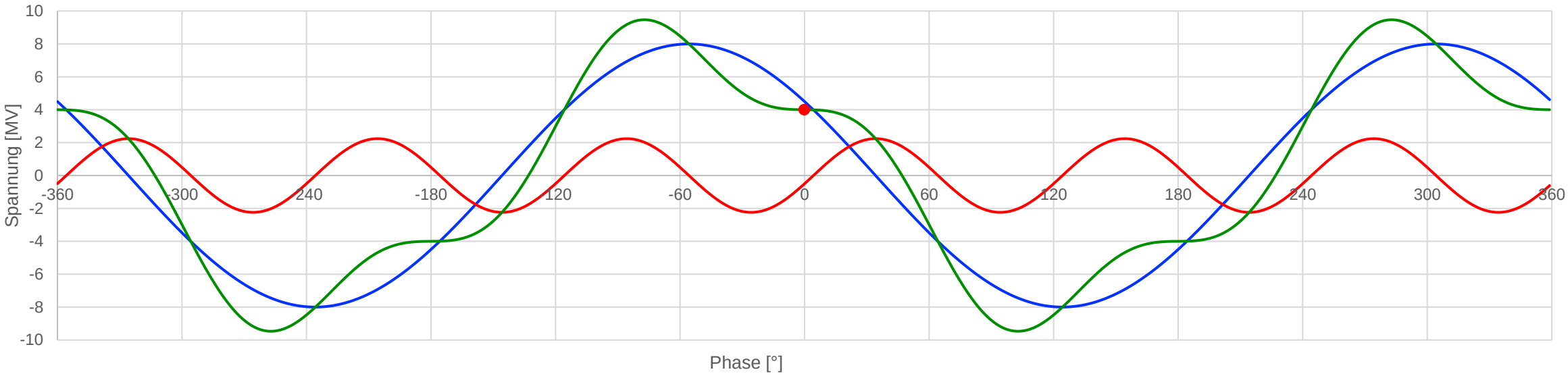
# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

Die Elektronen sehen nun die Summe beider Spannungsverläufe bei einem Umlauf.

Summe = 500 MHz + 1.5 GHz

Die Amplituden und Phasen der 500 MHz und 1.5 GHz Schwingung wurden so gewählt, dass sich ein Wendepunkt bei der Sollphase ergibt ⟹ Steigung der Spannung = 0



# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

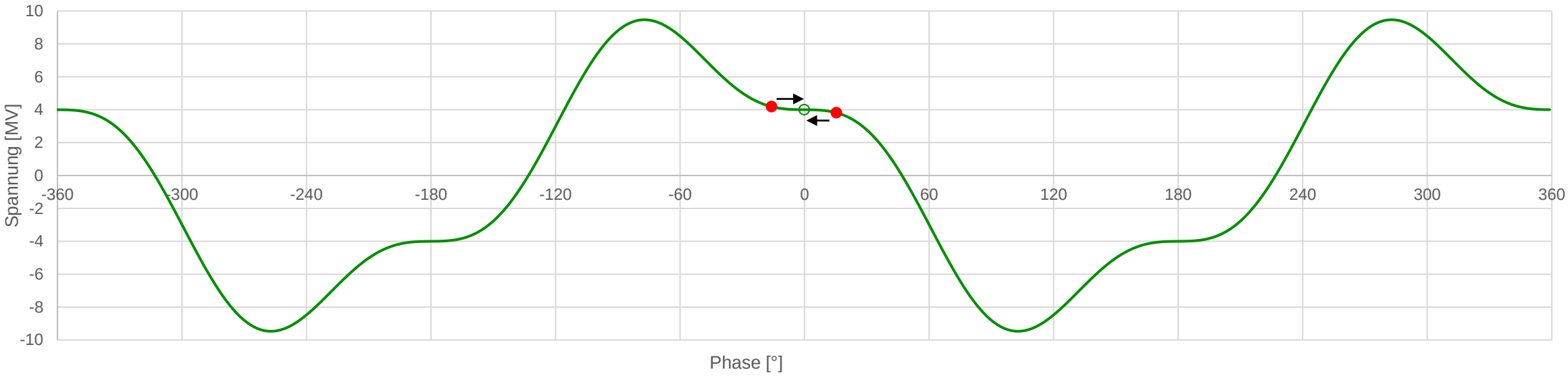
Für das ideale Teilchen auf der Sollphase ändert sich nichts.

Die von der Sollphase abweichenden Elektronen erfahren wieder eine Korrektur Richtung Sollphase, jetzt aber mit viel kleinerem „Regelhub“.

⟹ Schwächere Bündelung in Ausbreitungsrichtung ⟹ Längere Bunche

⟹ Weniger Bewegung der Elektronen um die Sollphase

⟹ Weniger Elektronen-Kollisionen ⟹ Emittanz wird viel langsamer größer ⟹ weniger Strahl geht verloren



# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Theorie

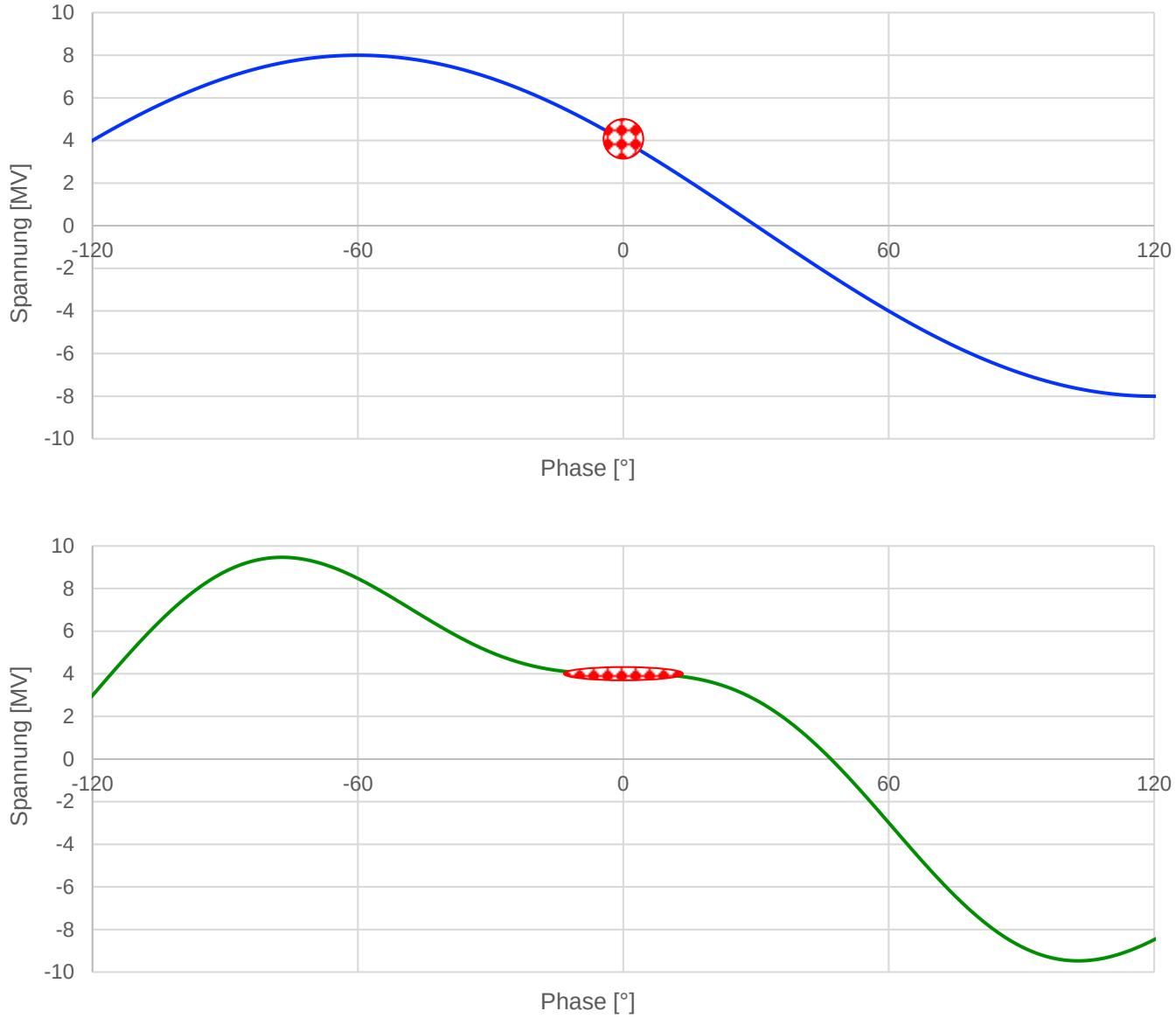
Bisher wurde die Elektron-Bewegung stärker dargestellt als sie ist, um das Prinzip zu verdeutlichen.

Hier sind nun in der Praxis auftretenden Bunch-Längen von

50 ps ≙ 9° ohne 3. Harmonische und

150 ps ≙ 27° mit 3. Harmonischen

zu sehen.



# 3. Harmonisches System

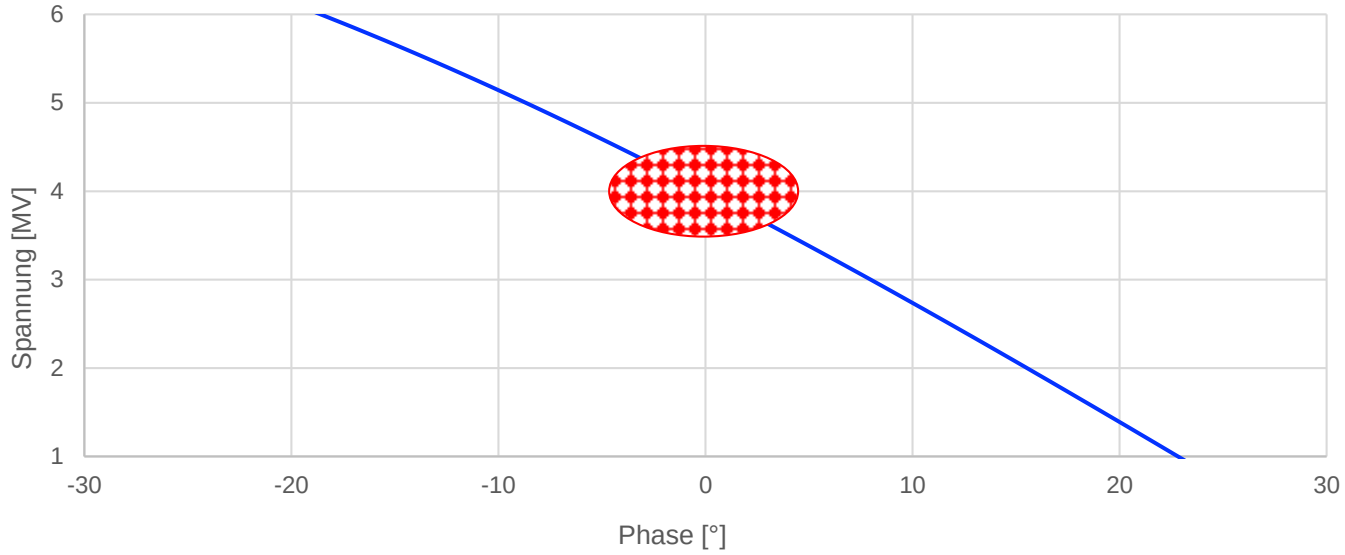
## Wie es wirkt – Theorie

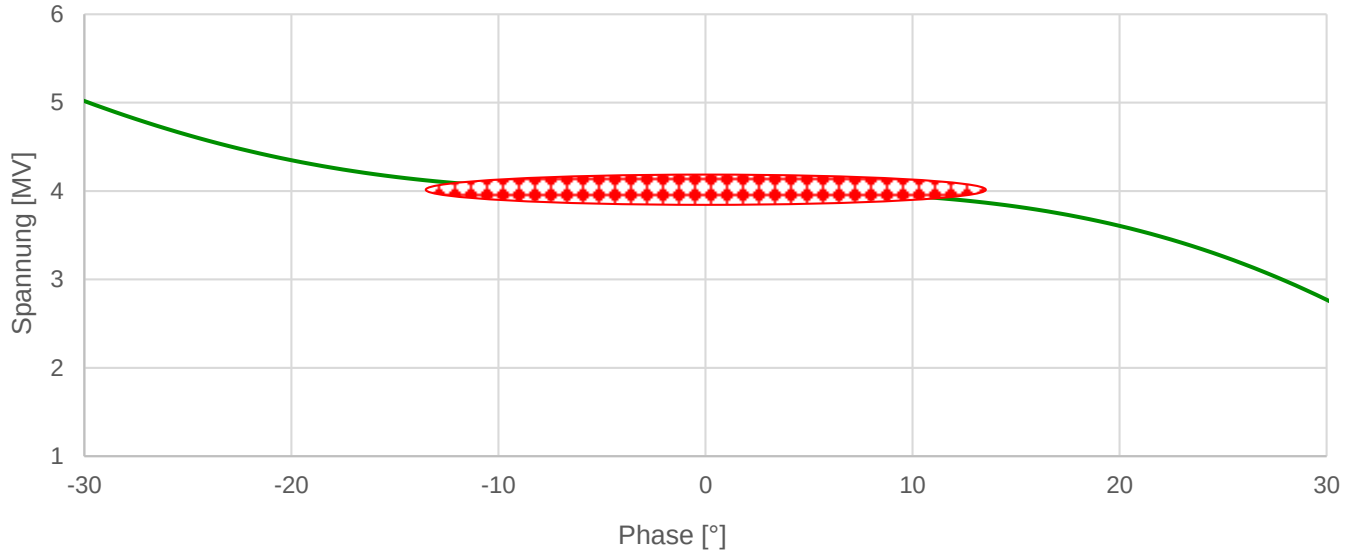
Hier nochmal im Zoom.

500 MHz alleine
- kurzer Bunch
- großer Energy Spread

Mit 3. Harmonischen
- längerer Bunch
- kleiner Energy Spread

Beim PETRA IV Betrieb gehen wir von einer Bunch-Verlängerung um den Faktor 3 aus.

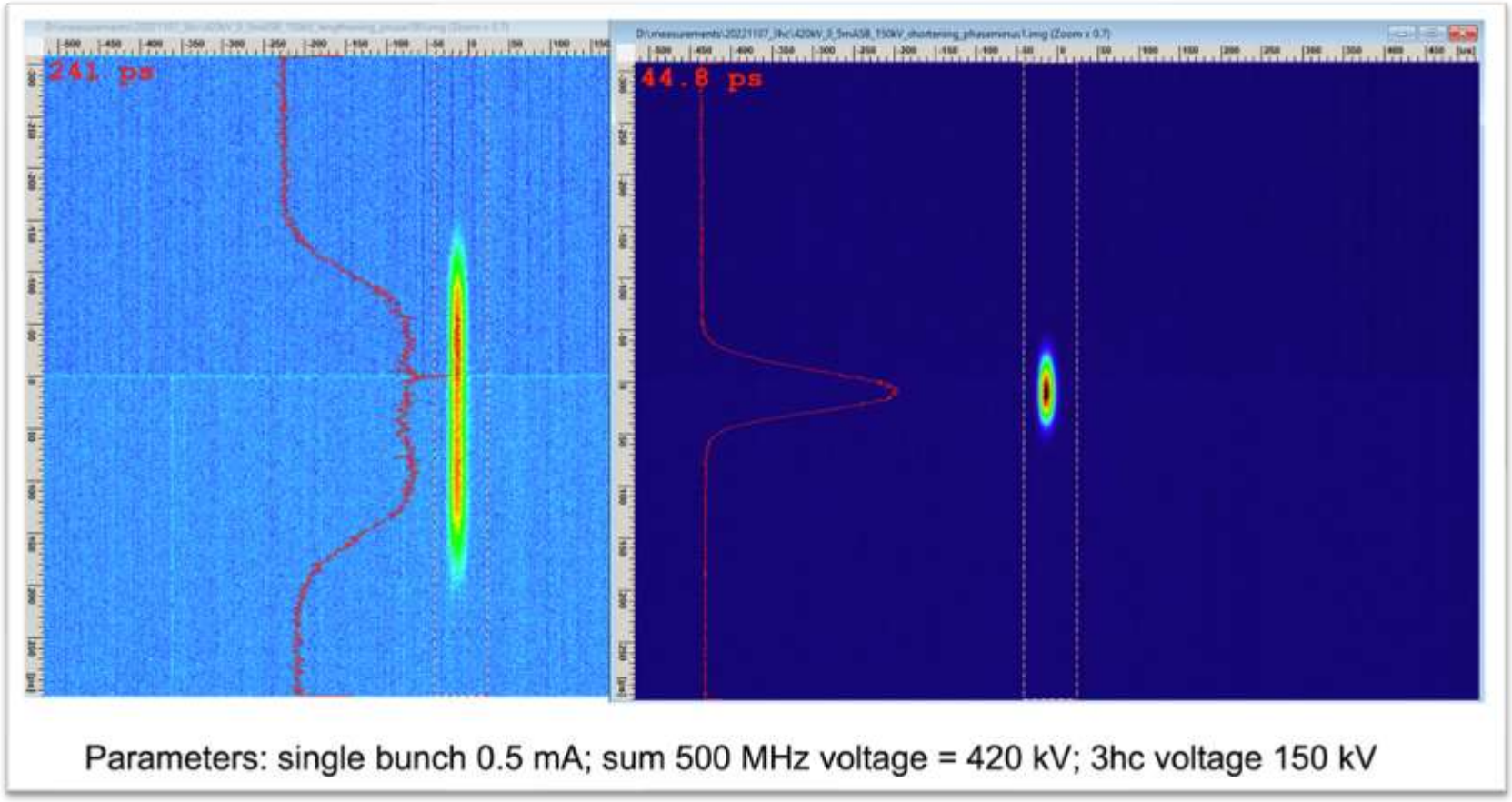


# 3. Harmonisches System

## Wie es wirkt – Praxis

- Im Helmholtz-Zentrum Berlin wurde dies 2022 praktisch mit einem Bunch ausprobiert.
- Die Bunch-Länge wurde von 45 ps auf 241 ps ausgedehnt.
- Hierbei ist zu beachten, dass bei geringen Ladungen Bunch-Verlängerungen, um mehr als den Faktor 3 möglich sind.




[Commissioning results of the Harmonic EU cavity (ALBA Active Design) at BESSY II, November 2022, A.Matveenko for 3hc team, 16.11.2022 ALBA 3HC meeting]

# 3. Harmonisches System

## Was für einen Kavitäten-Typ brauchen wir

- Bis hierher habe ich immer nur von einer Sinus-Schwingung pro Kavität gesprochen.
- In einem realen Resonator tritt aber nicht nur die eine gewünschte Resonanz auf.
- Neben der gewünschten Resonanz – in unserem Fall 1.5 GHz – gibt es noch eine Reihe weiterer Resonanzen bei höheren Frequenzen, die vom Elektronenstrahl angeregt werden können.
  - Man spricht von Higher Order Modes – HOMs.
- Je nachdem wie die Felder der HOMs wirken, können Sie den Strahl aus der Bahn werfen, weswegen in vielen Kavitäten HOM-Dämpfer eingesetzt werden, um diese zu unterdrücken.

- Wir entwickeln gerade eine Single-Mode-Kavität.
- Hier werden die kritischen HOMs nicht gedämpft, sondern können erst gar nicht entstehen.
- Das Problem mit HOMs im Strahlbetrieb wird vollständig eliminiert.