

Gemischt-symmetrische Zustände in sphärischen Kernen

Christopher Walz
Institut für Kernphysik
9. November 2010



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

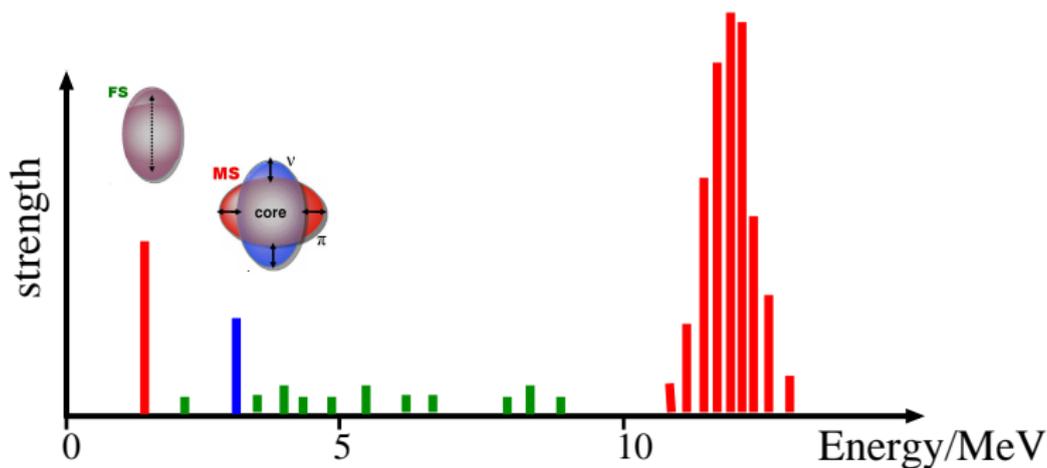


- ▶ Einleitung und Motivation
- ▶ Ziel des Experiments
- ▶ experimentelle Umsetzung
 - ▶ Elektronenstreuung
 - ▶ Protonenstreuung
- ▶ 4^+ gemischt-symmetrische Zustände
- ▶ Zusammenfassung

B(E2)-Stärke Verteilung in sphärischen Kernen

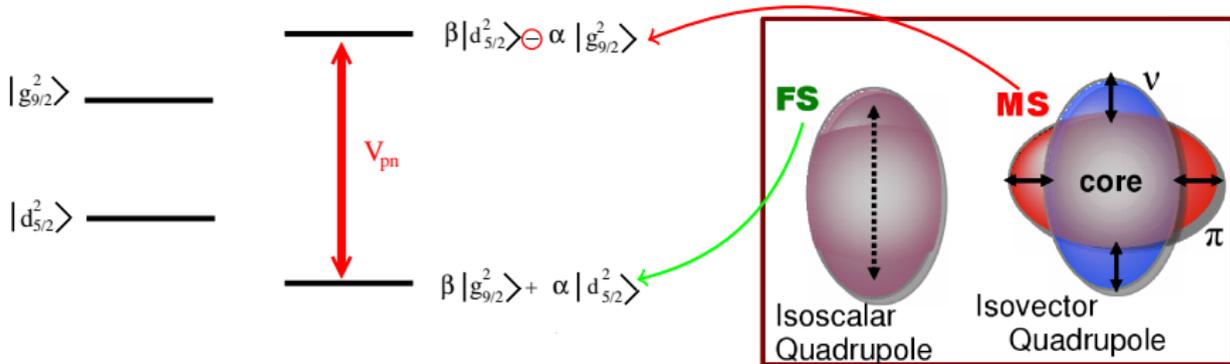


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

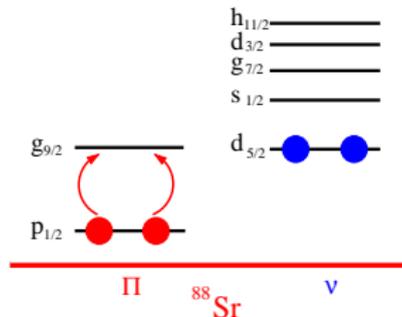


- ▶ symmetrischer Zustand: $B(E2) \sim 5 - 20$ W.u.
- ▶ gemischt-symmetrischer Zustand: $B(E2) \sim 1$ W.u.
- ▶ Quadrupol-Riesenresonanz: $B(E2) \sim 25-40$ W.u.
- ▶ Einteilchenzustände: $B(E2) < 1$ W.u.

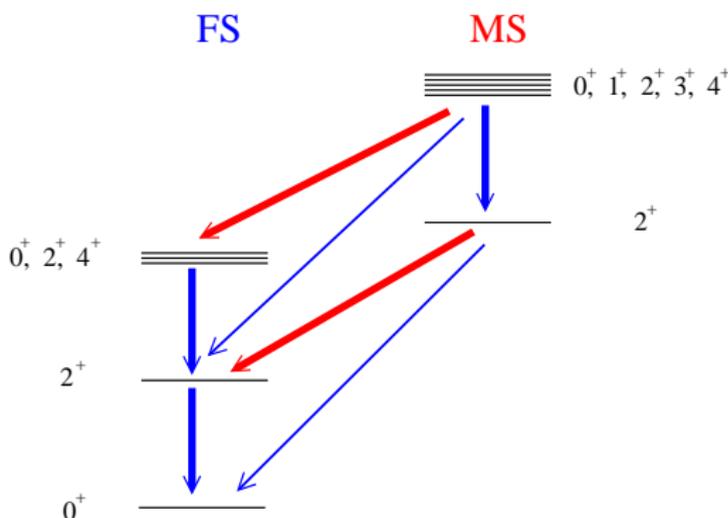
Was ist ein gemischt-symmetrischer Zustand?



- ▶ Zusammenhang: geometrisches und mikroskopisches Bild
- ▶ zwei Hauptkomponenten die Struktur des FS und MS festlegen

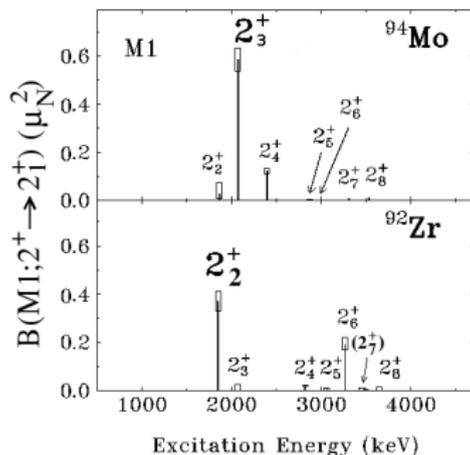


Experimentelle Signaturen



- starker M1 ($\sim 1 \mu_N^2$)
- schwach kollektiver E2 (~ 1 W.u.)
- kollektiver E2 (5–20 W.u.)

C



Ziel: Gibt es eine alternative Methode um gemischt-symmetrische Zustände zu identifizieren?



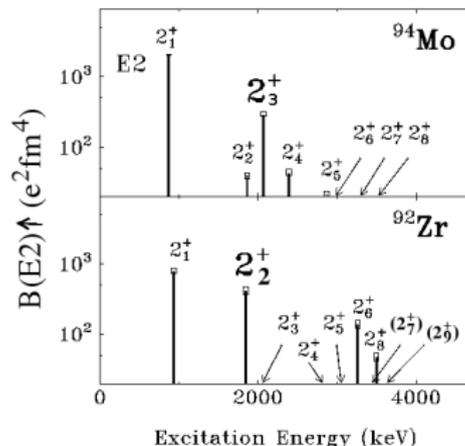
- ▶ Einleitung und Motivation
- ▶ Ziel des Experiments
- ▶ experimentelle Umsetzung
 - ▶ Elektronenstreuung
 - ▶ Protonenstreuung
- ▶ 4^+ gemischt-symmetrische Zustände
- ▶ Zusammenfassung

Woher kommen die großen B(E2)-Werte?

- ▶ verwendetes Kernstrukturmodell:
Quasi-particle Phonon Model (QPM)
- ▶ Hauptkomponenten erklären nicht
große B(E2)-Werte

$$|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + \dots$$

$$|2_{ms}^+\rangle = 0.56 |1g_{9/2}^2\rangle_p - 0.53 |2d_{5/2}^2\rangle_n + \dots$$



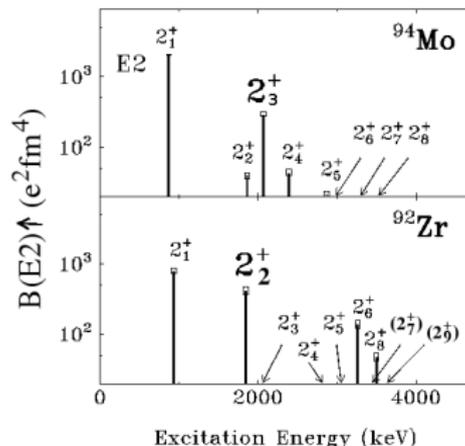
Woher kommen die großen B(E2)-Werte?



- ▶ verwendetes Kernstrukturmodell:
Quasi-particle Phonon Model (QPM)
- ▶ Hauptkomponenten erklären nicht
große B(E2)-Werte

$$|2_{fs}^+\rangle = 0.33|1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84|2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42|GQR\rangle$$

$$|2_{ms}^+\rangle = 0.56|1g_{9/2}^2\rangle_p - 0.53|2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.64|GQR\rangle$$



- ▶ Beimischung der isoskalaren Quadrupol-Riesenresonanz (GQR) in FS und MS erzeugt große B(E2)-Werte

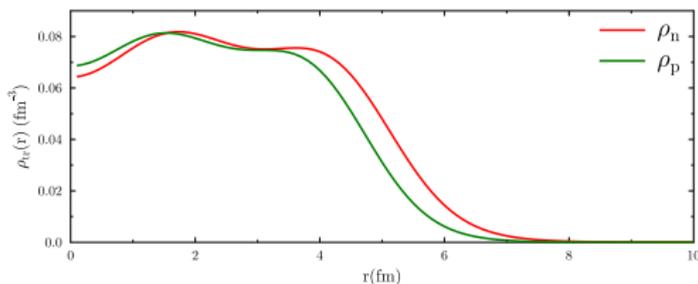
Observable: Die Übergangsdichte



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

experimentell nicht zugänglich

$$\langle 2_{ms}^+ | \hat{\rho} | 2_{ms}^+ \rangle$$



$$\langle 0^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle$$

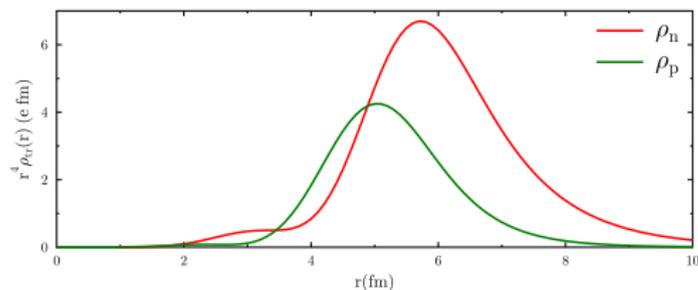
Observable: Die Übergangsdichte



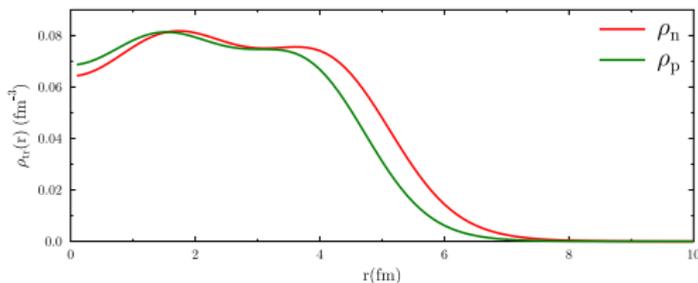
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

experimentell nicht zugänglich

$$\langle 2_{ms}^+ | \hat{\rho} | 2_{ms}^+ \rangle$$



$$\langle 2_{ms}^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle$$



$$\langle 0^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle$$



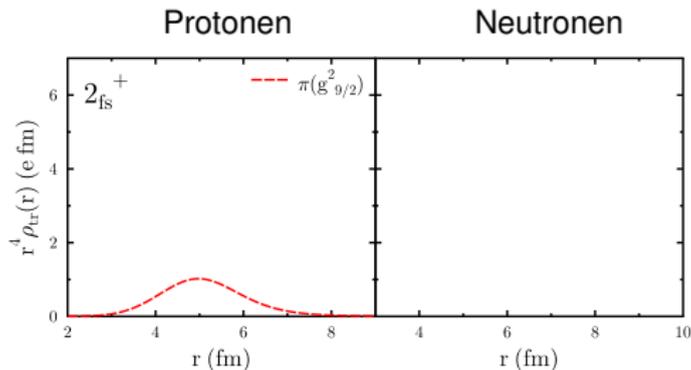
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

Amplitude

radiale
Abhängigkeit

► $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p +$
 $0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten



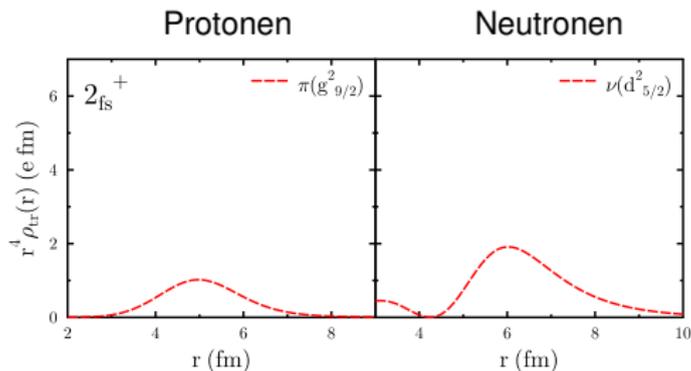
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

▶ $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



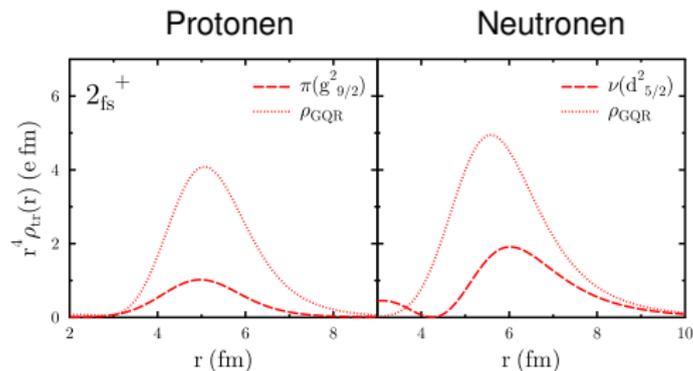
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

$$\begin{aligned} \triangleright |2_{fs}^+\rangle &= 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + \\ &0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |QQR\rangle \end{aligned}$$

Analyse der Übergangsdichten



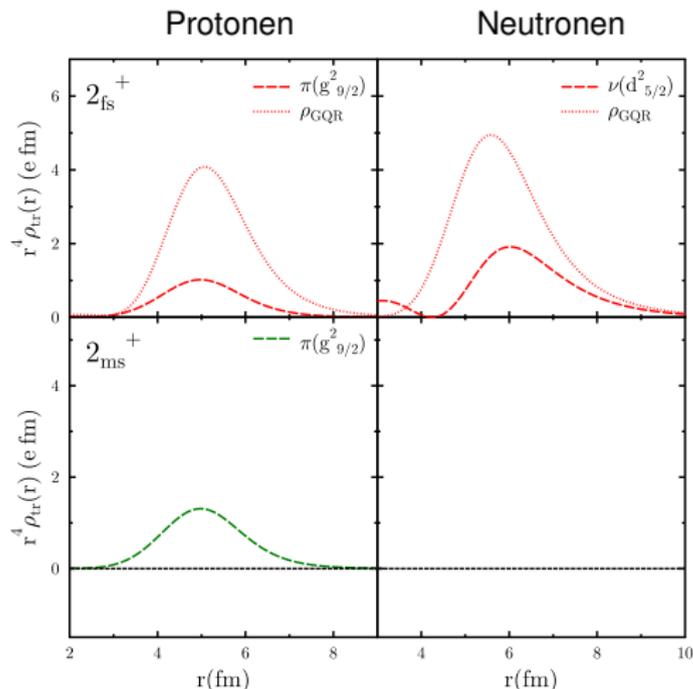
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

► $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p +$
 $0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten



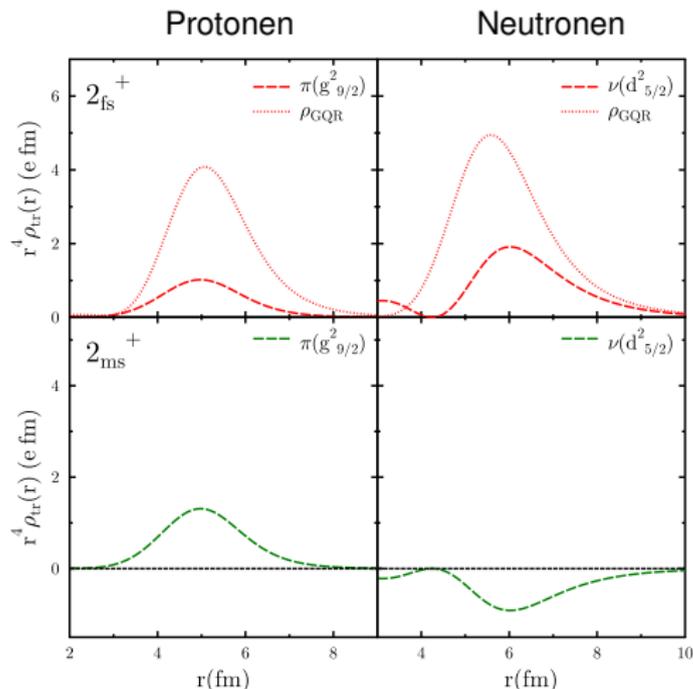
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

- ▶ $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$
- ▶ $|2_{ms}^+\rangle = 0.56 |1g_{9/2}^2\rangle_p - 0.53 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.64 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



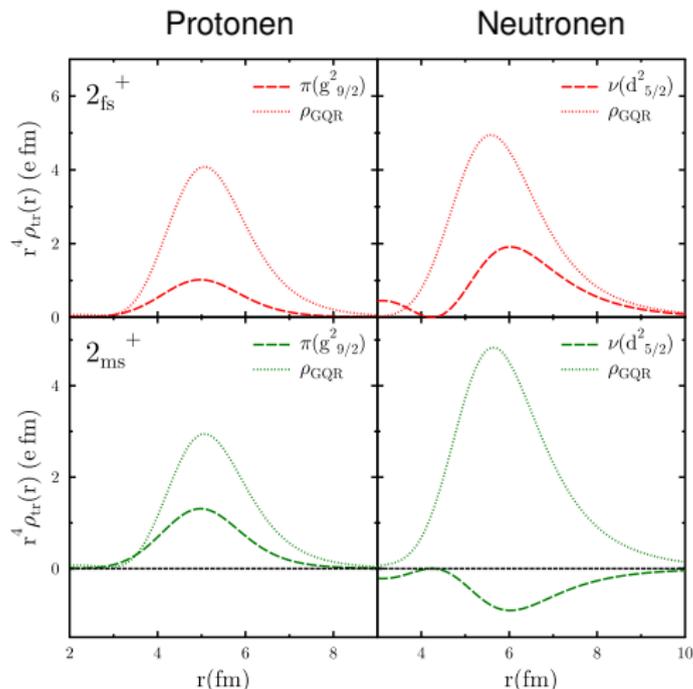
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

- ▶ $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$
- ▶ $|2_{ms}^+\rangle = 0.56 |1g_{9/2}^2\rangle_p \ominus 0.53 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.64 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



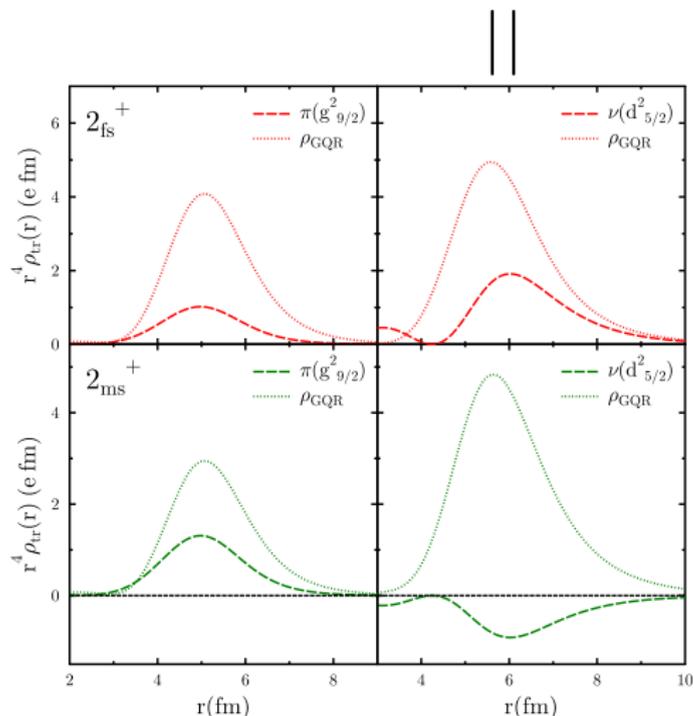
$$\langle 2_i^+ | \hat{\rho} | 0^+ \rangle = \sum_{jj'} c_{jj'} \cdot X_{jj'} \cdot u_{jj'}(r)$$

- ▶ $|2_{fs}^+\rangle = 0.33 |1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.84 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.42 |GQR\rangle$
- ▶ $|2_{ms}^+\rangle = 0.56 |1g_{9/2}^2\rangle_p - 0.53 |2d_{5/2}^2\rangle_n + 0.64 |GQR\rangle$

Analyse der Übergangsdichten

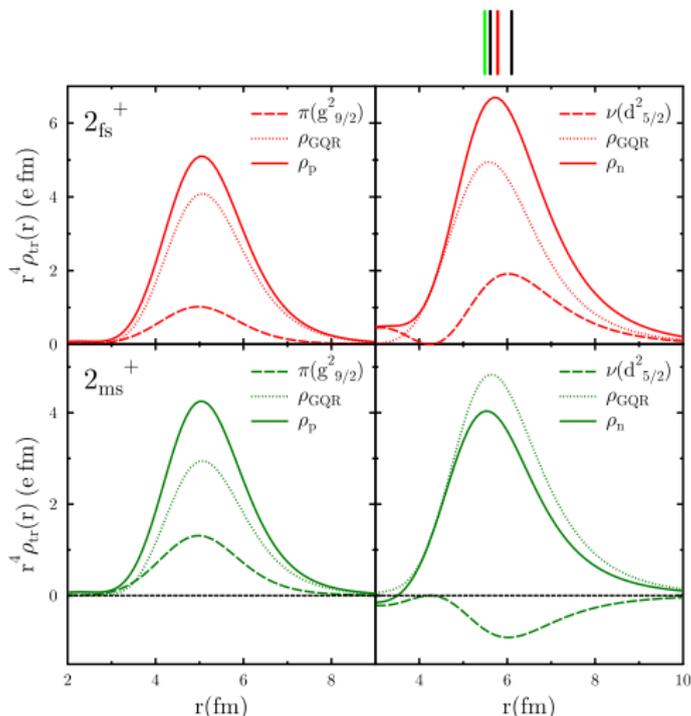


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- ▶ unterschiedliche radiale Abhängigkeiten:
 $R(2d_{5/2}^2)_n > R(GQR)_n$

Analyse der Übergangsdichten



- ▶ unterschiedliche radiale Abhängigkeiten:
 $R(2d_{5/2}^2)_n > R(GQR)_n$
- ▶ direkte Konsequenz des gemischt-symmetrischen Charakters:
 $R(2_{fs}^+)_n > R(2_{ms}^+)_n$
- ▶ kein Unterschied in den Ladungsradien:
 $R(2_{fs}^+)_p \approx R(2_{ms}^+)_p$



Überprüfe experimentell: $R(2_{fs}^+)_{n} > R(2_{ms}^+)_{n}$

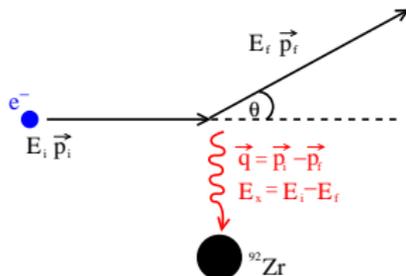
- ▶ Informationen über Neutronendichte nicht direkt zugänglich
- ▶ messe Masseradien ($\rho_{\text{matter}} = \rho_n + \rho_p$): $R(2_{fs}^+)_{\text{matter}} > R(2_{ms}^+)_{\text{matter}}$
- ▶ messe Ladungsradien: $R(2_{fs}^+)_{p} \approx R(2_{ms}^+)_{p}$

Protonenstreuung@
iTHEMBA

Elektronenstreuung@
S-DALINAC



- ▶ Einleitung und Motivation
- ▶ Ziel des Experiments
- ▶ experimentelle Umsetzung
 - ▶ Elektronenstreuung
 - ▶ Protonenstreuung
- ▶ 4^+ gemischt-symmetrische Zustände
- ▶ Zusammenfassung

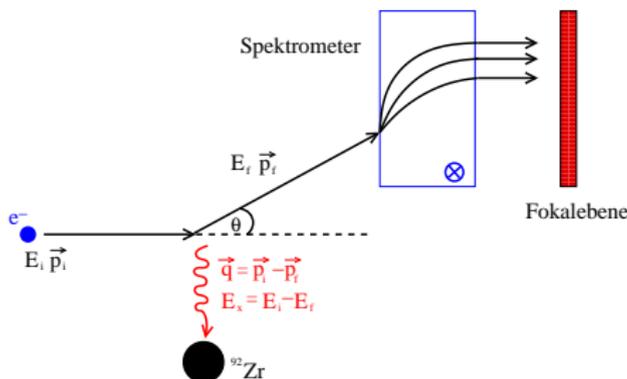


- ▶ elektromagnetische Wechselwirkung: Sensitiv auf Protonen

- ▶ Prozess charakterisiert durch:

→ Energieübertrag E_x
→ Impulsübertrag \vec{q} } **unabhängig variierbar**

- ▶ Messgröße: $|F(q)|^2 = (d\sigma/d\Omega)/(d\sigma/d\Omega)_{\text{Mott}}$



- ▶ elektromagnetische Wechselwirkung: Sensitiv auf Protonen

- ▶ Prozess charakterisiert durch:

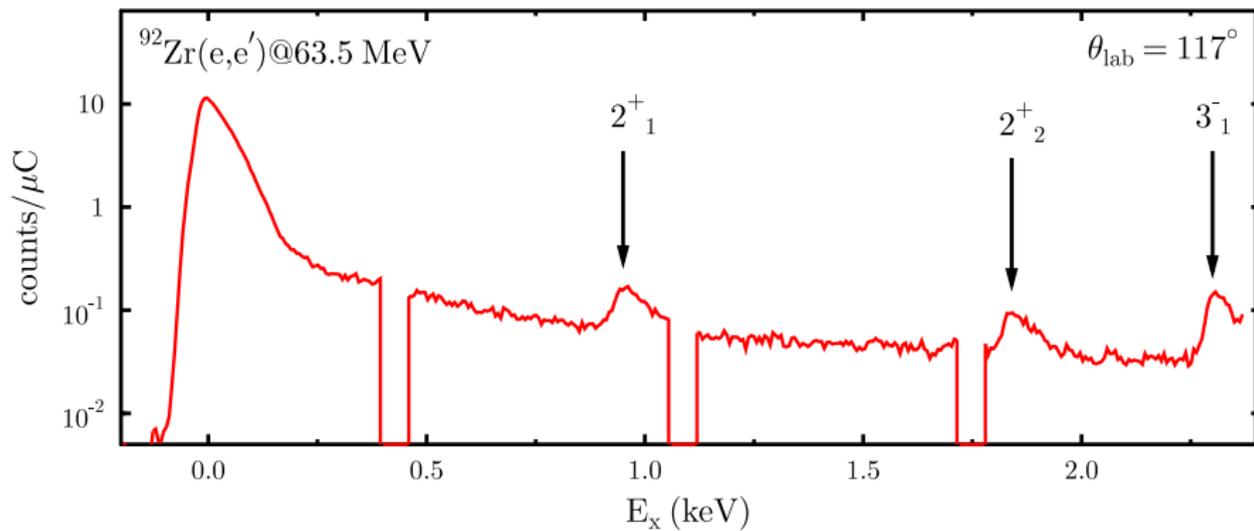
→ Energieübertrag E_x
→ Impulsübertrag \vec{q} } **unabhängig variierbar**

- ▶ Messgröße: $|F(q)|^2 = (d\sigma/d\Omega)/(d\sigma/d\Omega)_{\text{Mott}}$

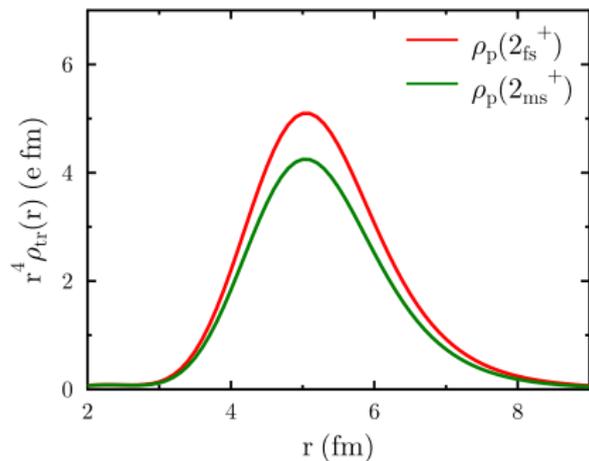
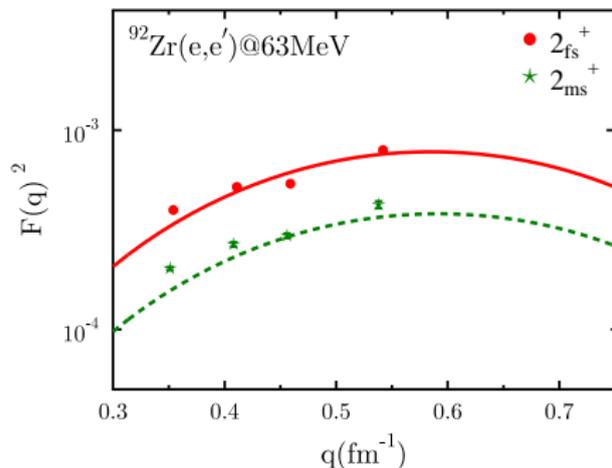
Elektronenstreuungsspektrum



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



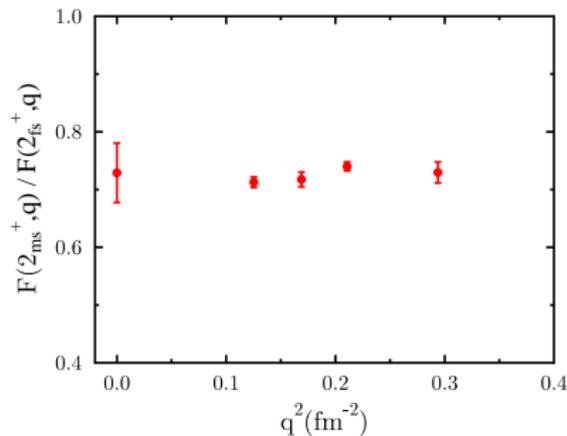
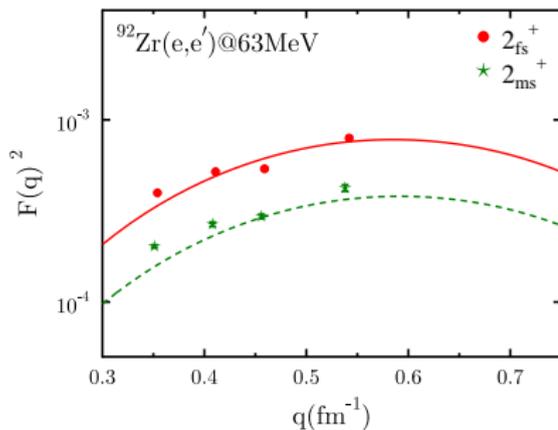
Zusammenhang: Formfaktor \Leftrightarrow Ladungsübergangsdichte



$$\rho(r) = \int_0^\infty F(q) \cdot j_2(qr) \cdot q^2 dq$$

- ▶ messe $F(q)$ um Ladungsdichte $\rho(r)$ zu bestimmen
- ▶ komplette Dichte mit Strahlenergien des S-DALINAC **nicht messbar**

Die Differenz der Ladungsradien



$$\frac{F(2_{ms}^+, q)}{F(2_{fs}^+, q)} = \frac{\cancel{f_c(2_{ms}^+)} \cdot \sqrt{B(E2_{ms}^+)} \cdot (1 - (q^2/14) \cdot R_{ms}^2 + \dots)}{\cancel{f_c(2_{fs}^+)} \cdot \sqrt{B(E2_{fs}^+)} \cdot (1 - (q^2/14) \cdot R_{fs}^2 + \dots)}$$

- ▶ Radien gleich wenn Verhältnis der Formfaktoren konstant
- ▶ gut erfüllt für die fünf Messpunkt: $R_{ms}^2 \approx R_{fs}^2$



Überprüfe experimentell: $R(2_{fs}^+)_{n} > R(2_{ms}^+)_{n}$

- ▶ Informationen über Neutronendichte nicht direkt zugänglich
- ▶ messe Masseradien ($\rho_{\text{matter}} = \rho_n + \rho_p$): $R(2_{fs}^+)_{\text{matter}} > R(2_{ms}^+)_{\text{matter}}$

Protonenstreuung@
iTHEMBA

- ▶ messe Ladungsradien: $R(2_{fs}^+)_{p} \approx R(2_{ms}^+)_{p}$

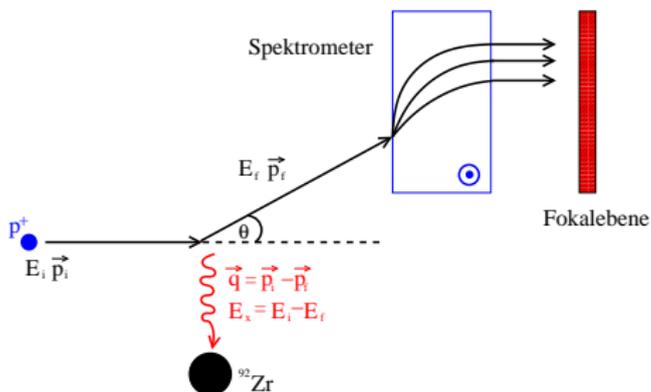


Elektronenstreuung@
S-DALINAC

Grundlagen der Protonenstreuung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

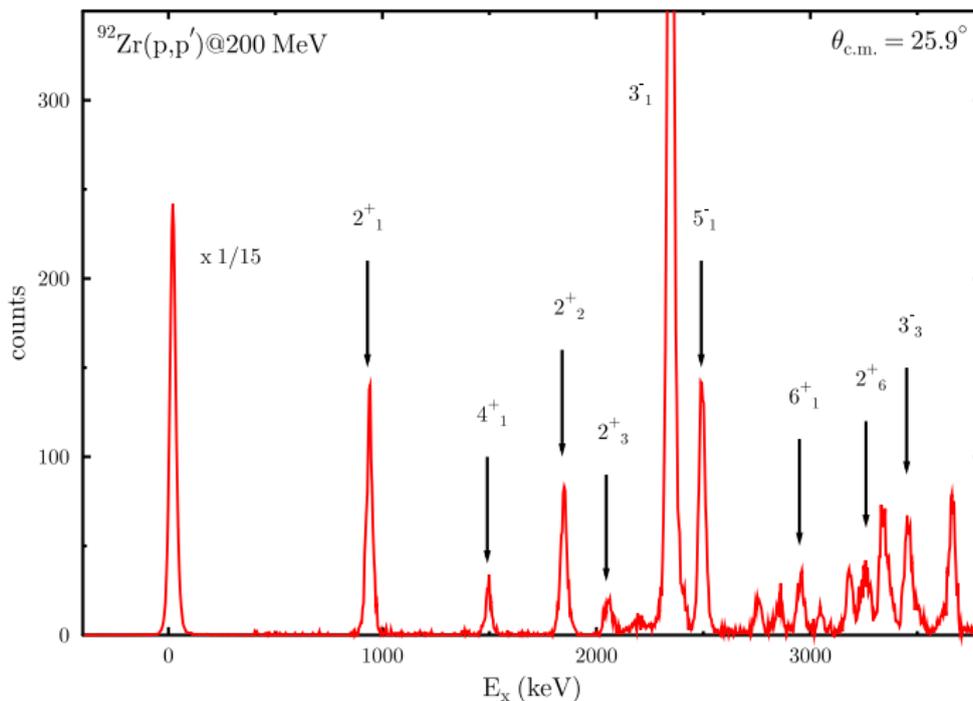


- ▶ starke Wechselwirkung: Sensitiv auf Protonen und Neutronen
- ▶ Prozess charakterisiert durch:
 - Energieübertrag E_x
 - Impulsübertrag \vec{q} } unabhängig variierbar
- ▶ Messgröße: $d\sigma/d\Omega$

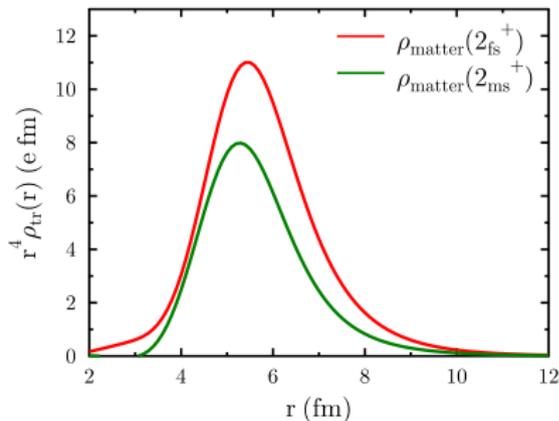
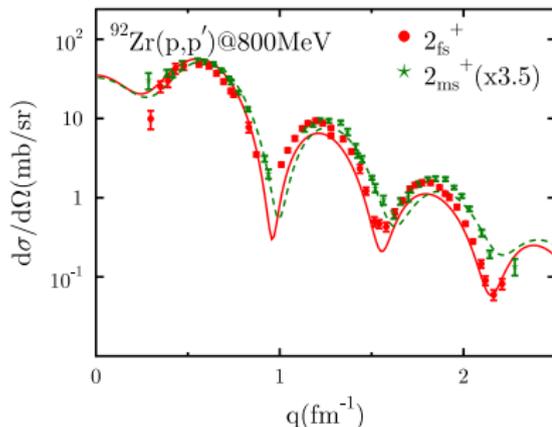
Protonenstreuungsspektrum



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



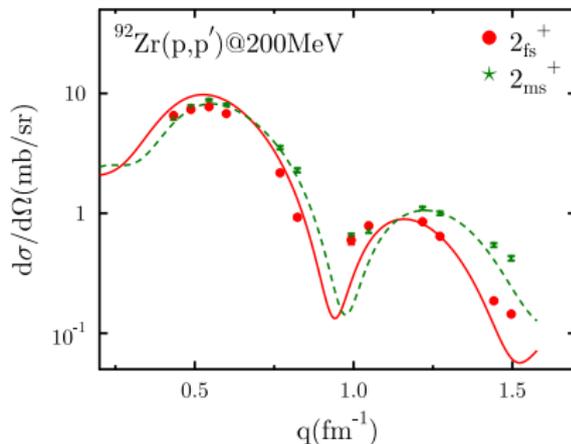
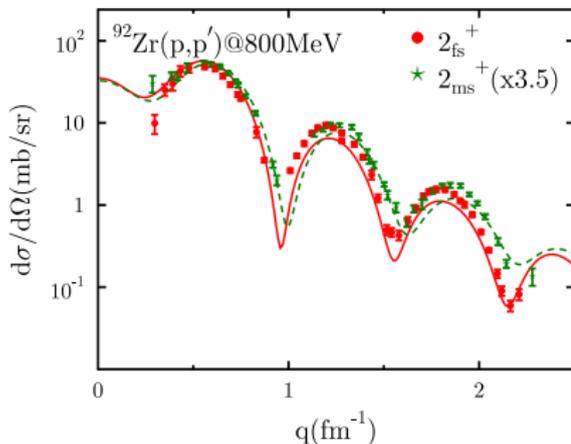
Zusammenhang: Wirkungsquerschnitt \Leftrightarrow Masseübergangsdichte



$$\rho_{\text{matter}} \xrightarrow{\text{effektive Wechselwirkung}} (d\sigma/d\Omega)_{\text{theo}} \Leftrightarrow (d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}$$

- ▶ Winkelverteilung der Wirkungsquerschnitte sensitiv auf Masseradien
- ▶ **Verschiebung beweist unterschiedliche Masseradien**
- ▶ gute Beschreibung der Wirkungsquerschnitte durch das QPM

Zusammenhang: Wirkungsquerschnitt \Leftrightarrow Masseübergangsdichte



$$\rho_{\text{matter}} \xrightarrow{\text{effektive Wechselwirkung}} (d\sigma/d\Omega)_{\text{theo}} \Leftrightarrow (d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}$$

- ▶ Winkelverteilung der Wirkungsquerschnitte sensitiv auf Masseradien
- ▶ **Verschiebung beweist unterschiedliche Masseradien**
- ▶ gute Beschreibung der Wirkungsquerschnitte durch das QPM



Überprüfe experimentell: $R(2_{fs}^+)_{n} > R(2_{ms}^+)_{n}$



- ▶ Informationen über Neutronendichte nicht direkt zugänglich

- ▶ messe Masseradien ($\rho_{\text{matter}} = \rho_n + \rho_p$): $R(2_{fs}^+)_{\text{matter}} > R(2_{ms}^+)_{\text{matter}}$



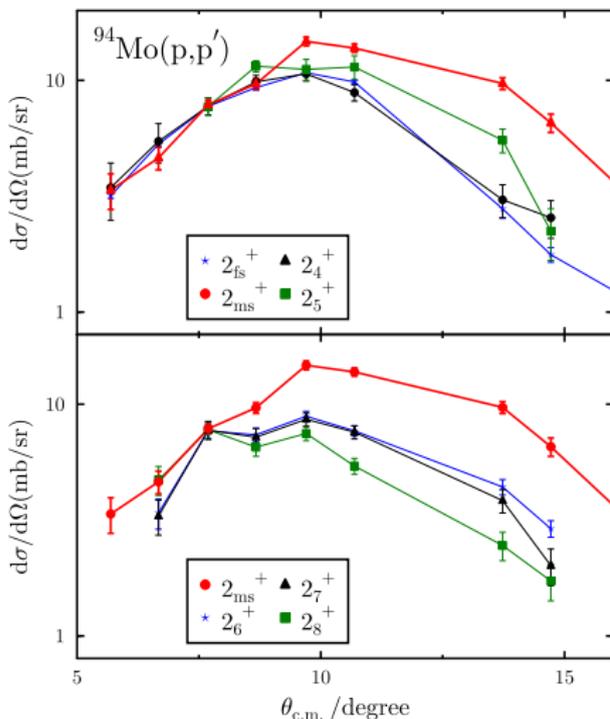
Protonenstreuung@iTHEMBA

- ▶ messe Ladungsradien: $R(2_{fs}^+)_{p} \approx R(2_{ms}^+)_{p}$



Elektronenstreuung@S-DALINAC

Situation in ^{94}Mo



► charakteristische Winkelverteilung des gemischt-symmetrischen Zustandes

► kleinster Masseradius von allen gemessenen Quadrupole-Zuständen

► eindeutige Identifikation des gemischt-symmetrischen Zustandes über Protonenstreuung möglich

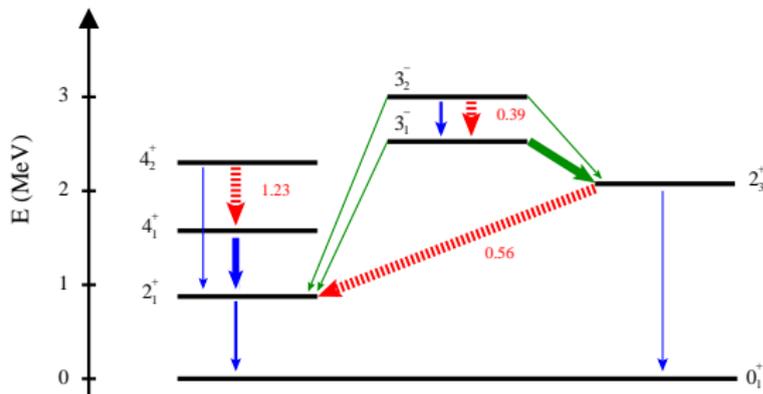


- ▶ Einleitung und Motivation
- ▶ Ziel des Experiments
- ▶ experimentelle Umsetzung
 - ▶ Elektronenstreuung
 - ▶ Protonenstreuung
- ▶ 4^+ gemischt-symmetrische Zustände
- ▶ Zusammenfassung

Levelschema von ^{94}Mo

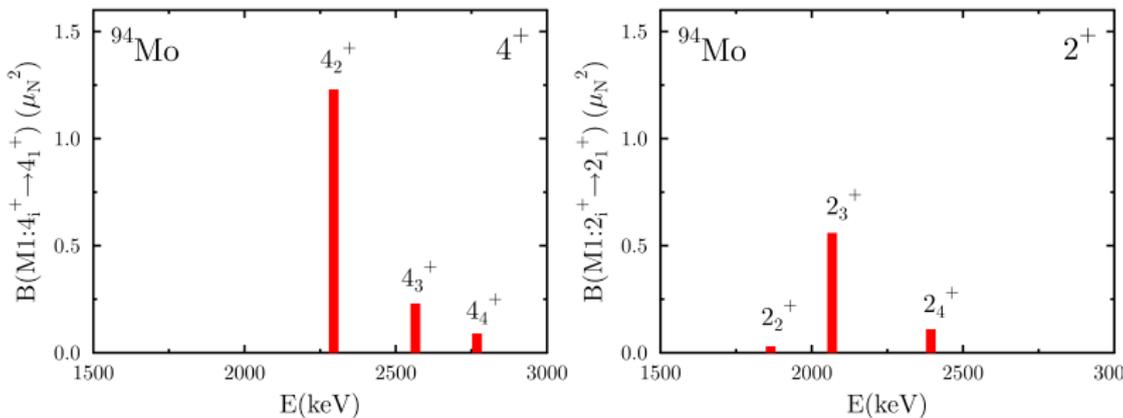


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

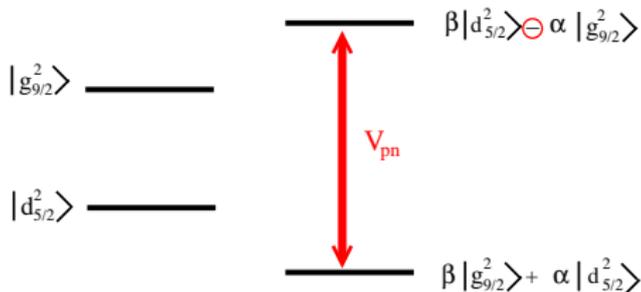


- ▶ bisher bekannt: quadrupol gemischt-symmetrische Zustände
- ▶ großer $B(M1)$ -Wert zwischen 4_2^+ und 4_1^+ Zuständen
→ Hinweis auf **hexadecapol gemischt-symmetrischen Zustand?**

2⁺ und 4⁺ Zustände im Vergleich



- ▶ $B(M1:4_2^+ \rightarrow 4_1^+)$ -Wert **erhöht**: analoge Situation zu 2⁺ Zuständen
- ▶ starker experimenteller Hinweis auf MS-Charakter:
Gibt es einen anderen Mechanismus?



- ▶ QPM sagt hexadecapol MS-Zustand voraus

$$|4_{fs}^+\rangle = 0.41|1g_{9/2}^2\rangle_p + 0.89|2d_{5/2}^2\rangle_n + \dots$$

$$|4_{ms}^+\rangle = 0.85|1g_{9/2}^2\rangle_p - 0.45|2d_{5/2}^2\rangle_n + \dots$$

- ▶ Mischung mit Zwei-Phononen Zustand

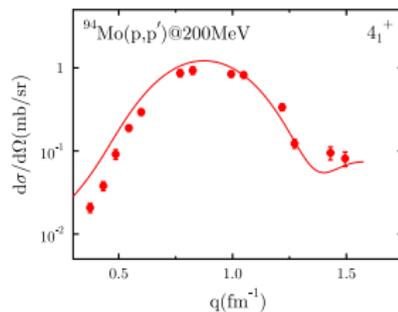
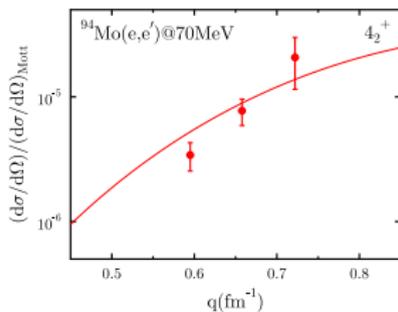
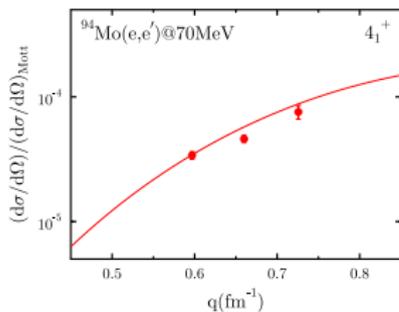
$$|4_1^+\rangle = 0.79|4_{fs}^+\rangle + 0.55[2_1^+ \otimes 2_1^+] + \dots$$

$$|4_2^+\rangle = 0.78|4_{ms}^+\rangle + 0.32[2_1^+ \otimes 2_1^+] + \dots$$

Test der QPM-Wellenfunktionen

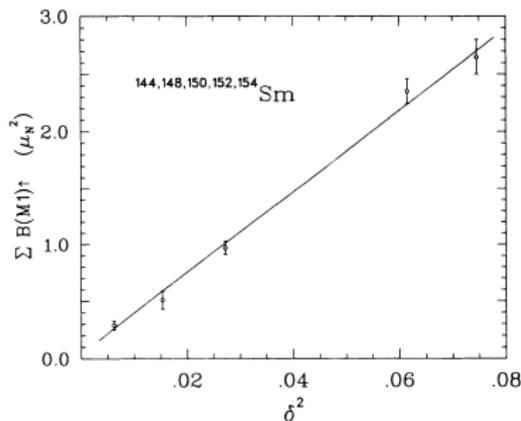
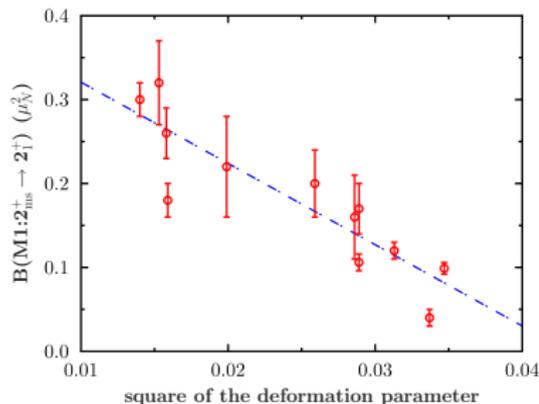


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



	exp	theo	
B(E4)-Wert	-	4.5 W.u.	✓
B(E4)-Wert	-	0.8 W.u.	✓
B(M1)-Wert	$1.23(20)\mu_N^2$	$1.58\mu_N^2$	✓
E(4_1^+)	1574 keV	1109 keV	✗
E(4_2^+)	2295 keV	2032 keV	✓

Deformationsabhängigkeit des $B(M1)$ -Wertes



- ▶ **entgegengesetzte** Deformationsabhängigkeit als Scherenmode
- ▶ Grund: Fragmentierung?
- ▶ bisher nicht verstanden



- ▶ neue Signatur zur Identifikation eines MS-Zustandes unabhängig von $B(M1)$ -Werten
 - ▶ kleiner Neutronenübergangsradius $R_n(2_{ms}^+) < R_n(2_{fs}^+)$
 - ▶ Protonen- und Elektronenstreuung
 - ▶ 2_2^+ in ^{92}Zr und 2_3^+ in ^{94}Mo
 - ▶ MS-Zustand in deformierten Kernen?

- ▶ starker Hinweis auf einen hexadecapol MS-Zustand in ^{94}Mo im Rahmen des QPM

- ▶ Deformationsabhängigkeit des $B(M1)$ -wertes