

Kapitel 5

Monochromatoren

Die Experimente der vorliegenden Arbeit wurden am Synchrotronspeicherring BESSY I durchgeführt. Der TGM 6 als Undulatorbeamline wurde wegen des besonders hohen Photonenflusses bei kleiner Strahldivergenz gewählt. Am TGM 7 wurden die Experimente in der UHV-Anlage des HMI durchgeführt. Dieser Meßplatz ist für Messungen an Halbleitern geeignet. Beide Monochromatoren werden im folgenden kurz vorgestellt. Im Anschluß daran werden das Konzept und die projizierten Parameter des im Aufbau befindlichen Monochromators des MBI bei BESSY II beschrieben.

5.1 TGM 6 bei BESSY I

Im BESSY I Speicherring gibt es lediglich einen einzigen Wiggler/Undulator (s. Anhang, Kap. 7). Die Undulatorstrahlung steht alternativ dem TGM 5 oder dem TGM 6 zur Verfügung. Während sich der TGM 5 im direkten Strahlengang des Undulators befindet, wird der Strahl durch Einschwenken eines Umlenkspiegels zum TGM 6 gelenkt, der sich auf einer erhöhten Arbeitsplattform befindet (Abb. 5.1). An den Undulatorbeamlines stehen hinter dem Monochromator hohe Photonenflüsse von $\sim 5 \cdot 10^{11} \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 100\text{mA} \cdot 0,1\% \text{Bandbreite}}$ bei sehr kleinen Strahldivergenzen ($< 1 \text{ mrad}$) zur Verfügung. Dies ist auch der Grund, weshalb am TGM 6 kein Refokussierspiegel benötigt wird. Der Strahl tritt divergent aus und hat am Austrittsspalt einen Querschnitt von $0,3 \times 0,3 \text{ mm}$. Der Strahl wird mit einem elliptischen Vorspiegel auf den Eintritts-

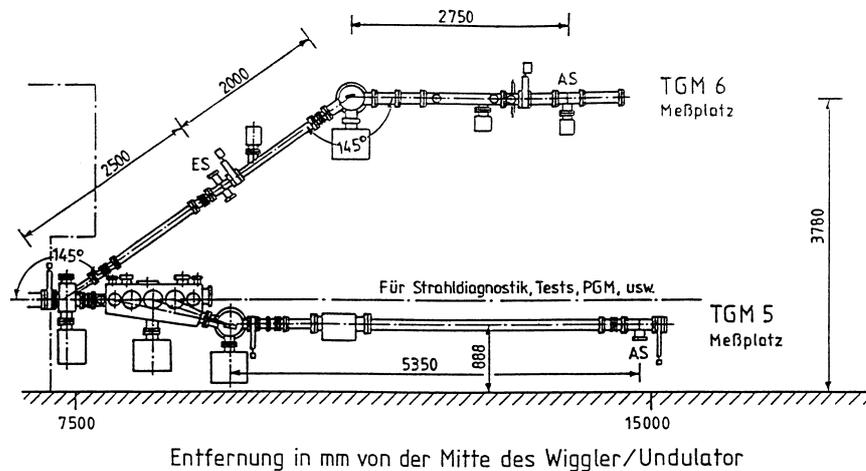


Abbildung 5.1: Seitenansicht der Strahlrohre TGM 5 und TGM 6 bei BESSY I.

spalt mit dem Faktor 1:3 verkleinert abgebildet. Es stehen drei Gitter zur Verfügung (480 l/mm für $12 \text{ eV} \leq h\nu \leq 3 \text{ eV}$, 900 l/mm für $25 \text{ eV} \leq h\nu \leq 60 \text{ eV}$ und 1690 l/mm für $40 \text{ eV} \leq h\nu \leq 120 \text{ eV}$). Für die vorliegenden Experimente wurde das 900 l/mm Gitter gewählt. Zum einen besitzt dieses bei 55 eV den größtmöglichen Photonenfluß, was für das Laser-Synchrotron Pump-Probe-Experiment am C_{60} erforderlich war. Zum anderen deckt es den für die Bestimmung des Ionisationsquerschnitts des C_{60} relevanten Energiebereich ab (s. Kap. 6.2.4). Um in diesem Experiment reproduzierbare experimentelle Bedingungen zu gewährleisten, insbesondere für alle Anregungsenergien dieselbe Stelle der Probe zu beleuchten, wurde bei konstantem Gap (53 mm) gearbeitet. Daher ist das Signal/Rauschverhältnis bei hoher Anregungsenergie deutlich schlechter. Damit können zwar keine absoluten Intensitäten im PES bestimmt werden, aber das war für dieses spezielle Experiment auch nicht erforderlich.

Abb. 5.2 zeigt den Photonenfluß des 900 l/mm Gitters (Gitter 2) als Funktion der Energie für verschiedene Undulatorgaps. Mit dem 900 l/mm Gitter weist der TGM 6 eine Auflösung $\frac{E}{\Delta E}$ von ungefähr 1800 auf (bei $125 \mu\text{m}$ Spaltöffnung). Durch Öffnen der Spalte wurde im Pump-Probe Experiment die Transmission auf Kosten der Auflösung vergrößert, da hier die Auflösung nur eine untergeordnete Rolle spielte. Weitere Informationen zum TGM 6 finden sich in [BP85].

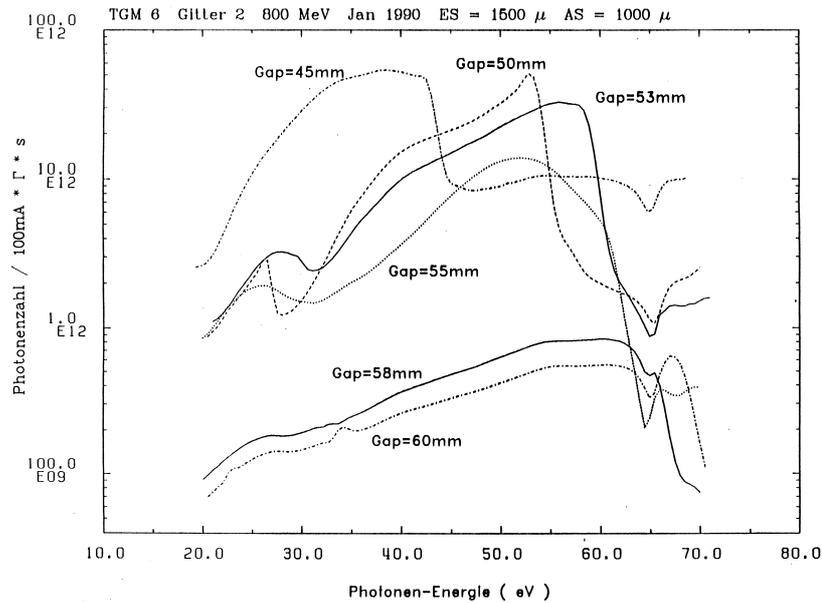


Abbildung 5.2: *Photonenfluß als Funktion der (am Monochromator eingestellten) Photonenergie für das 900 l/mm Gitter am TGM 6. Die Kurven wurden für verschiedene Undulatorgaps aufgenommen.*

5.2 TGM 7 bei BESSY I

Der TGM 7 ist ebenso wie der TGM 6 ein Toroidgitter-Monochromator. Sein optischer Aufbau (Seitenansicht) ist in Abb. 5.3 gezeigt. Ein Fokussierspiegel bündelt das Licht aus dem Dipolmagneten auf den Eintrittsspalt, ein Toroidgitter sorgt für die Wellenlängenselektion und ein Refokussierspiegel bildet den Austrittsspalt auf die Probe ab. Zwei Refokussierspiegel können alternativ für zwei unterschiedliche Experimente genutzt werden. Im vorliegenden Experiment wurde der Spiegel FS_2 (Abb. 5.3) benutzt, der eine 1:2 Abbildung erzeugt. Es stehen zwei Gitter zur Auswahl: 250 l/mm für $6 \text{ eV} \leq h\nu \leq 32 \text{ eV}$ und 950 l/mm für $20 \text{ eV} \leq h\nu \leq 120 \text{ eV}$. Mit dem höherenergetischen Gitter wurden Übersichtsspektren zur Beurteilung der Qualität von gespaltenen Halbleiterproben gemessen. Das niederenergetische Gitter wurde verwendet, um den Bereich der Valenzbandkanten aufzunehmen. Der Abgleich der Laser-Synchrotron-Synchronisation wurde in nullter Ordnung (Reflexion) des 950 l/mm Gitters durchgeführt, da nur dieses eine für die Signalauswertung mit der hier verwendeten Photodiode ausreichende Intensität lieferte. In allen Experimenten wurde der absolute Photostrom am goldbedampften Refokussierspiegel gemessen. Mit Kenntnis des Photonenflusses

ließen sich damit die gemessenen Spektren um den Effekt sinkender Anregungsintensität (aufgrund fallenden Ringstromes) korrigieren. Die spektrale Auflösung $\frac{E}{\Delta E}$ des Monochromators beträgt für das 950 l/mm Gitter etwa 650 (bei 500 μm Spaltöffnung). Für Ringströme $I_{Ring} \geq 300$ mA liefert dieser Monochromator einen mittleren Photonenfluß von 10^{13} s^{-1} und eine mittlere Auflösung von $E/\Delta E = 500$ [HK89]. Da bei den am TGM 7 durchgeführten Experimenten jedoch die Auflösung eine eher untergeordnete Rolle spielte, wurde durch Öffnen der Spalte ein höherer Photonenfluß auf Kosten der Auflösung eingestellt. Die Spotgröße im Fokus beträgt 1 mm im Durchmesser. Eine ausführliche Darstellung des TGM 7 findet sich unter [HK89].

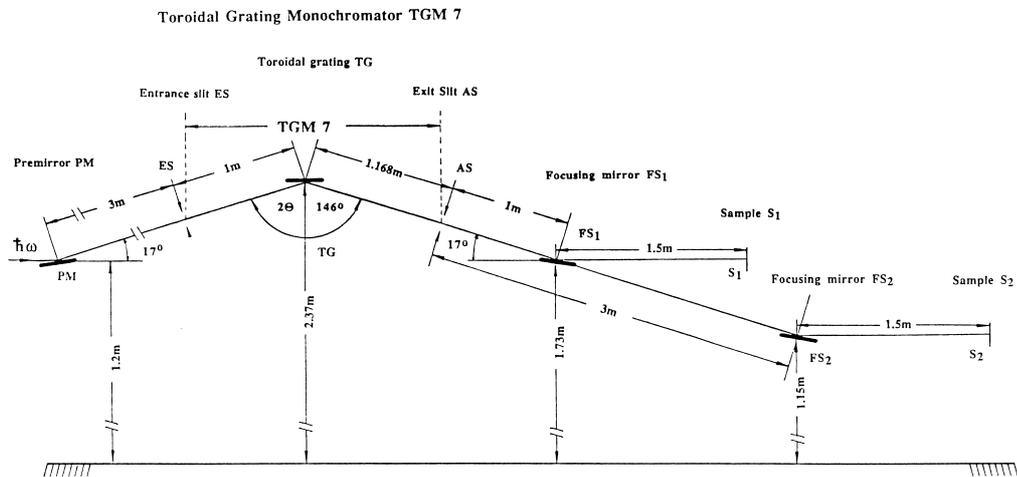


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau des TGM 7 Monochromators. Es wird der Refokussierspiegel FS_2 in diesem Experiment benutzt.

5.3 MBI Beamline bei BESSY II

An Elektronenbeschleunigern, die eigentlich für die Elementarteilchenphysik gebaut waren, begann die Nutzung der als Nebenprodukt anfallenden Synchrotronstrahlung. Die Synchrotronstrahlungsquellen der zweiten Generation, zu denen auch BESSY I zählt, wurden gebaut ausschließlich zur Erzeugung und Nutzung der Synchrotronstrahlung. Durch den Einsatz von Wiggler¹ und Undulatoren¹ ist eine weitere wichtige Ent-

¹Die Erklärung der Funktionsweise eines Wiggler/Undulators befindet sich in Kap. 7 im Anhang.

wicklung hinzugekommen. Diese sog. „insertion devices“ befinden sich in den geraden Strecken des Speicherrings und besitzen wesentliche Vorteile in Bezug auf Intensität und Brillanz² der Strahlung. BESSY II ist ein Vertreter dieser 3. Generation von Speicherringen, die speziell auf den Betrieb solcher „insertion devices“ optimiert sind [BES86, BES89].

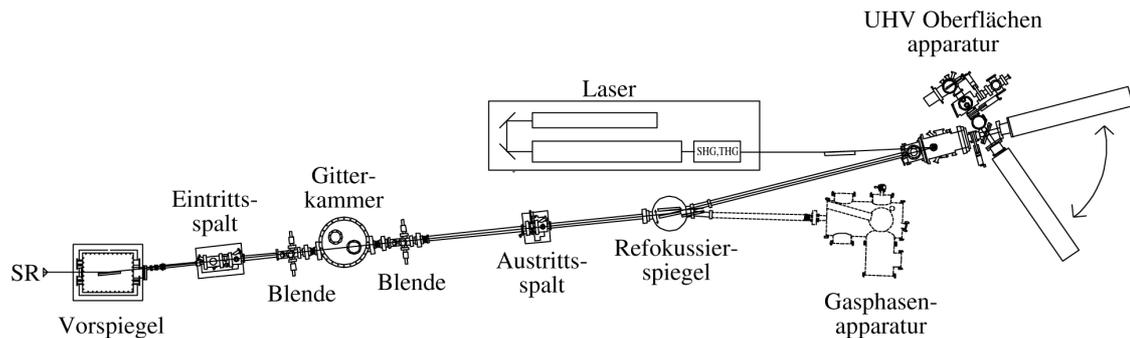


Abbildung 5.4: Schema des MBI-Strahlrohres bei BESSY II. (Es sind nur die Komponenten außerhalb der Strahlenschutzmauer gezeigt.) Ein Toroidspiegel fokussiert das Licht auf den Eintrittsspalt des Monochromators. Mit Hilfe von zwei verschiedenen Refokussierspiegeln kann der Strahl entweder in die Oberflächen UHV - oder in die Gasphasenapparatur geleitet werden.

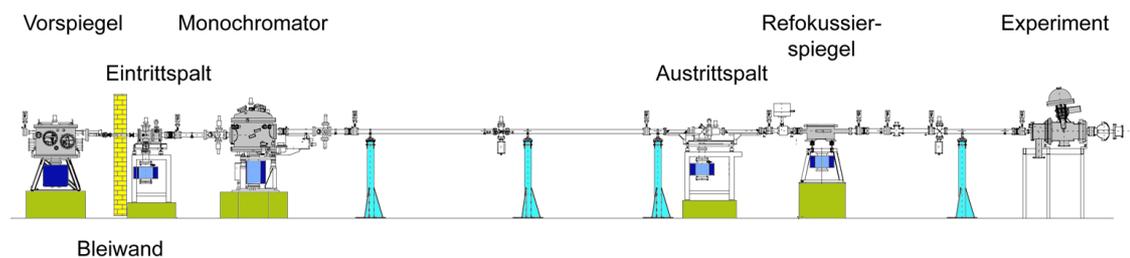


Abbildung 5.5: Seitenansicht des MBI-Strahlrohres bei BESSY II. Aus Strahlenschutzgründen ist der Toroid-Vorspiegel mit einer Bleimauer abgeschirmt. Rechts ist die UHV-Oberflächenapparatur mit dem nach oben zeigenden Elektronenspektrometer zu sehen.

Für die Durchführung kombinierter Laser- und Synchrotron Pump-Probe-Experi-

²Der Fluß bezeichnet die Anzahl der Photonen, die pro Sekunde in einem spektralen Intervall gegebener Bandbreite durch eine gegebene Blende treten. Die Brillanz gibt den Photonenfluß, bezogen auf den räumlichen Öffnungswinkel und die Größe des Quellflecks der Strahlung, an. Sie ist eine Erhaltungsgröße und kann nicht, z.B. durch Einbringen von optische Elementen, vergrößert werden.
 Dimension[Fluß] = $\frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 0,1\% \text{Bandbreite}}$; Dimension[Brillanz] = $\frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0,1\% \text{Bandbreite}}$

mente sind daher die Undulatoren besonders geeignet. Mit ihnen läßt sich im Vergleich zum Dipolmagneten ein bis zu 100-fachen Fluß monochromatischer Photonen erreichen. Insbesondere bei hoher Auflösung kann aufgrund der höheren Brillianz am Undulator ein bis zu 1000-fach höherer Photonenfluß realisiert werden.

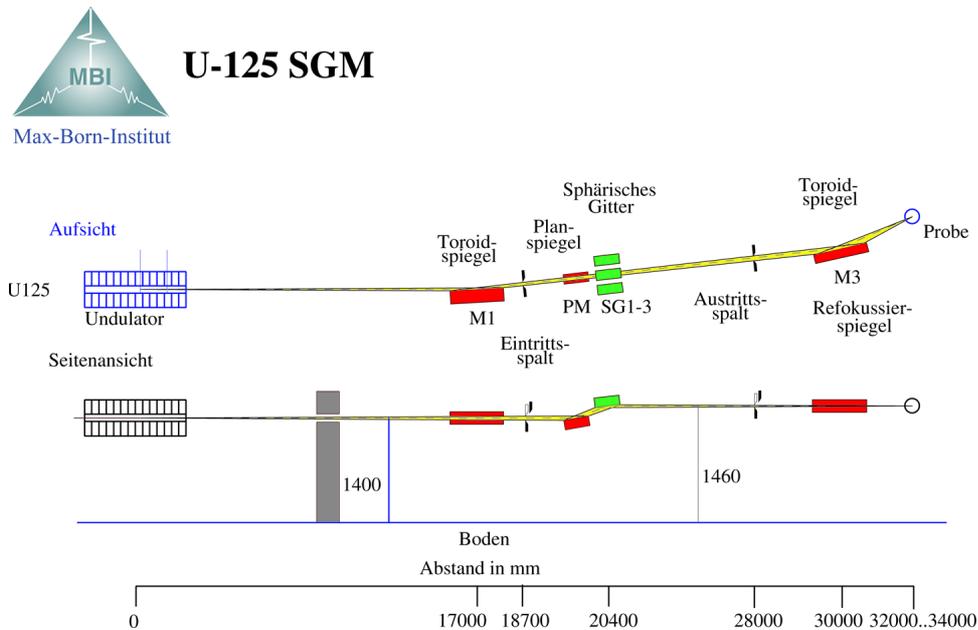


Abbildung 5.6: Aufsicht und Seitenansicht des Strahlprofils in der MBI-Beamline bei BESSY II [GWQ98].

Derzeit befindet sich die Beamline der „MBI Nutzer-Facility“ am Undulator U 125 bei BESSY II in der Erprobung (siehe auch Gatzke et al. in [GWQ98]). Der Undulator U 125 (Magnetperiode 125 mm) mit seiner hohen Brillianz von $10^{17} \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 100 \text{mA} \cdot 0,1\% \text{Bandbreite}}$ ist für kombinierte Laser-Synchrotron-Pump-Probe-Experimente besonders geeignet. Bei einem Ringstrom von 100 mA kann damit ein Photonenfluß von $10^5 \frac{\text{Photonen}}{\text{Puls}}$ (innerhalb 0,1 % spektraler Bandbreite) erreicht werden. Dieser Wert ist etwa um einen Faktor 10^5 kleiner im Vergleich zu einer typischen Laserquelle.³ Abb. 5.4 zeigt eine Draufsicht auf die „MBI Beamline-Facility“ mit der UHV-Oberflächen-Apparatur (siehe Kap. 3.3) am Ende. Die XUV-Strahlung wird mit einem Toroidspiegel auf den Eintrittsspalt des Monochromators fokussiert. In dieser Kammer befinden sich zwei Spiegel, die den Undulatorstrahl entweder der MBI Beam-

³Man beachte, daß die spektrale Bandbreite eines Lasers typischerweise um einen Faktor 10^2 kleiner ist als die 0,1%, die typischerweise für Synchrotronangaben verwendet wird.

line (U 125/2) oder der Nachbarbeamline (U 125/1) zuleiten. In der MBI Beamline folgen nach dem Monochromator der Austrittsspalt und die Refokussierspiegel, die den Strahl alternativ in die Oberflächen- oder in eine Gasphasenapparatur leiten. Die Gasphasenapparatur wird zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden. In Abb. 5.5 ist die Seitenansicht der Beamline mit der UHV-Oberflächenapparatur gezeigt. Die Strahlführung in der Beamline zeigt Abb. 5.6. Mit drei auswechselbaren Gittern überdeckt

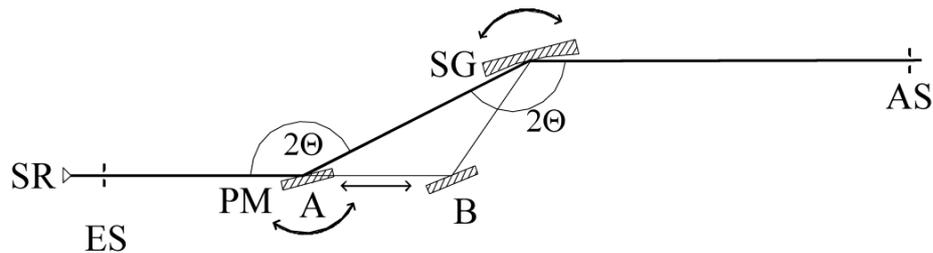


Abbildung 5.7: Strahlführung im MBI-Monochromator [GWQ98].

der Monochromator einen Energiebereich von ca. 10 - 350 eV. Die spektrale Auflösung $\frac{E}{\Delta E}$ liegt stets oberhalb von 10^4 . Abb. 5.8 zeigt die berechnete Auflösung sowie die Photonenflüsse für die jeweiligen Gitter. Bei einem Energiescan wird das Gap im Undulator passend zu der Photonenenergie am Monochromator eingestellt. Abb. 5.7 zeigt

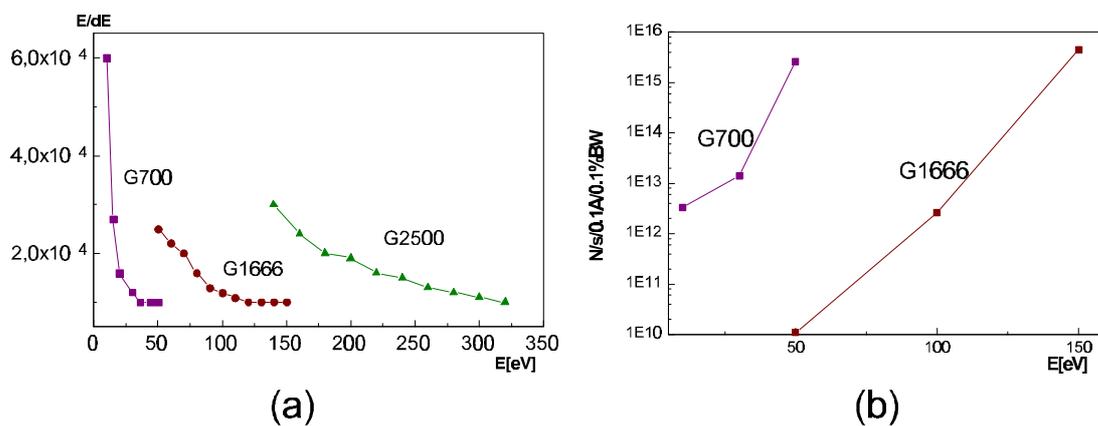


Abbildung 5.8: Berechnete Auflösung $\frac{E}{\Delta E}$ für die drei verwendeten Gitter (a) und Photonenfluß für das 700 und 1666 1/mm Gitter (b) als Funktion der Photonenenergie. (Abb. und Berechnung von J. Gatzke [GWQ98].)

den Strahlengang im Monochromator. Ein Planspiegel (PM) kann zwischen den Positionen A und B verfahren werden, so daß der Strahl immer die Mitte des sphärischen

Gitter	Energiebereich (eV)	Liniendichte (1/mm)	Blazewinkel (°)	Radius (mm)
G700	10 - 50	700	1,7	17100
G1666	50 - 150	1666	1,5	17100
G2500	150 - 350	2500	1,2	25200

Tabelle 5.1: *Parameter der verwendeten Gitter (siehe [GWQ98]).*

Gitters (SG) beleuchtet. Planspiegel und Gitter werden beim Scanvorgang gedreht („included-angle principle“). In Tabelle 5.1 sind die Eigenschaften der verwendeten Gitter zusammengefaßt. Besonderes Augenmerk galt der Unterdrückung der aus dem Undulator stammenden höheren Harmonischen. Diesem Effekt wird durch die Verwendung geblazter Gitter entgegengewirkt. Zur Justage der Strahlführung sind eine Reihe von unterschiedlichen Sensoren in die Beamline integriert. Die Lage des Strahls wird mit Fluoreszenzschirmen kontrolliert, der Photonenfluß kann mit Goldnetzen bestimmt werden. Zur Energiekalibrierung des Monochromators ist in die Beamline eine Gaszelle integriert. Damit können bekannte Absorptionsbanden gemessen und mit der am Monochromator eingestellten Photonenenergie verglichen werden.