

# Vermessung der horizontalen Strömungen in Sonnenflecken

Masterarbeit  
in der Wissenschaftsdisziplin Physik

eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Potsdam

Erstgutachter und Betreuer: apl. Prof. Dr. Carsten Denker  
Zweitgutachter: apl. Prof. Dr. Gottfried Mann

Philipp Kummerow  
Matrikel-Nr.: 751126

16. März 2015



Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam  
An der Sternwarte 16  
14482 Potsdam



Universität Potsdam, Campus Golm  
Institut für Physik und Astronomie (Haus 28)  
Karl-Liebknecht-Straße 24/25  
14476 Potsdam-Golm

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Geschichte der Sonnenbeobachtung . . . . .	2
1.2	Die Sonne . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Solar Dynamics Observatory</b>	<b>7</b>
2.1	Fakten zum Forschungssatelliten . . . . .	7
2.2	Instrumente . . . . .	8
2.2.1	Atmospheric Imaging Assembly . . . . .	8
2.2.2	Extreme Ultraviolet Variability Experiment . . . . .	9
2.2.3	Helioseismic and Magnetic Imager . . . . .	10
2.3	SolarMonitor . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Sonnenflecken</b>	<b>12</b>
3.1	Struktur eines Sonnenflecks . . . . .	12
3.1.1	Umbra . . . . .	12
3.1.2	Penumbra . . . . .	13
3.2	Entstehung . . . . .	13
3.3	Klassifizierung . . . . .	15
3.3.1	Systematik nach Waldmeier . . . . .	15
3.3.2	Magnetische Einteilung nach Hale . . . . .	17
3.3.3	McIntosh System . . . . .	17
3.4	Sonnenfleckenzyklus . . . . .	18
3.5	Wilson-Effekt . . . . .	20
3.6	Strömungen in Sonnenflecken und ihrer Umgebung . . . . .	20
3.6.1	Evershed-Effekt . . . . .	20
3.6.2	Moat-Flow . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Datenverarbeitung und -analyse</b>	<b>22</b>
4.1	Methoden . . . . .	22
4.1.1	Local Correlation Tracking . . . . .	22
4.1.2	Differential Affine Velocity Estimator . . . . .	23
4.2	Analyse . . . . .	23
4.2.1	Vorbetrachtung . . . . .	23
4.2.2	Datenverarbeitung . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>28</b>
5.1	Bestimmung der Fleckenausdehnung . . . . .	28
5.2	Horizontale Geschwindigkeitsfelder . . . . .	28
5.2.1	Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Datensätze . . . . .	28
5.2.2	Großer Einzelfleck NOAA 11899 . . . . .	33
5.2.3	Ausgedehnte Fleckengruppe NOAA 11967 . . . . .	33
5.3	Azimal gemittelte Strömungsparameter . . . . .	34
5.3.1	Intensitätsverlauf mit zunehmenden Radius . . . . .	34
5.3.2	Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmenden Radius . . . . .	35
5.3.3	Radiale Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmenden Radius . . . . .	36

5.3.4	Divergenzverlauf mit zunehmenden Radius	36
5.4	<b>Ost-West Asymmetrie</b>	<b>37</b>
5.5	<b>Zusammenhang von Magnetfeldstärke und Intensität</b>	<b>38</b>
5.6	<b>Einfluss der Fleckengröße</b>	<b>40</b>
6	<b>Fazit</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>45</b>
	<b>Appendix A – Übersicht aller Sonnenflecken</b>	<b>49</b>
	<b>Appendix B – Abkürzungen</b>	<b>77</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>78</b>

## Zusammenfassung

Die Sonne, als der uns am nächsten gelegene Stern, kann uns als Forschungsobjekt eine Vielzahl von Erkenntnissen verschaffen. Ein genaues Verständnis der Prozesse in der Sonne macht neue Entwicklungen wie z.B. auf dem Gebiet der Plasmaphysik möglich. Außerdem haben einige Phänomene, wie die Auswirkungen des Weltraumwetters, auch Einfluss auf das Leben auf der Erde. Der heutige Stand der Technik eröffnet uns zu diesem Zweck eine völlig neue Dimension der Sonnenbeobachtung. Satelliten im Weltraum, wie das Solar Dynamics Observatory (SDO), liefern hochaufgelöste Bilder in einer Vielzahl von Wellenlängen und basierend auf den unterschiedlichsten Darstellungsmethoden.

In dieser Arbeit werden horizontale Strömungen innerhalb von Sonnenflecken näher untersucht. Dabei wurde sich auf unipolare und achsensymmetrische Sonnenflecken mit einer ausgeprägten Penumbra beschränkt, da ihre schlichte Struktur eine einfache theoretische Beschreibung ermöglicht. Für dieses Ziel wurden 27 Zeitserien von Sonnenflecken mit einer Dauer von 12 Stunden betrachtet, die mit Hilfe von Daten des Satelliten SDO erstellt wurden. Der besonders große Fleck NOAA 11899 nahm eine besondere Rolle in der Untersuchung ein, da so eine mögliche Abhängigkeit der Messdaten von der Ausdehnung eines Sonnenflecks betrachten werden konnte. Desweiteren wurde als Abgrenzung, zu den symmetrischen Fleckentypen, eine komplexe bipolare Fleckengruppe (NOAA 11967) ebenfalls in Augenschein genommen.

Im Vorfeld der eigentlichen Analyse wurden einige Bildkorrekturen vorgenommen. Dazu gehören die Korrektur des Zeitversatzes von Daten verschiedener Instrumente. Desweiteren musste die differentielle Rotation und die Randverdunklung der Sonne berücksichtigt werden. Als Bildausschnitt wurde ein Fenster mit der Größe von  $160 \text{ Mm} \times 160 \text{ Mm}$  gewählt. Die Strömungen in den aktiven Regionen wurden anschließend mit Hilfe des Local Correlation Tracking und des Differential Affine Velocity Estimator näher ausgewertet. Ein Schwerpunkt der Auswertung wurde auf die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten gelegt. Dies betrifft sowohl den Abstand vom Zentrum des Sonnenflecks als auch die räumliche Ausdehnung. Die verschiedenen Strömungen innerhalb und in der näheren Umgebung eines Sonnenflecks wurden systematisch analysiert und mit vorhandenen Modellen verglichen. Hierbei konnte die Ost-West Asymmetrie der Strömungen in einem Sonnenfleck bestätigt werden. Die im aktiven Gebiet NOAA 11899 gemessenen Strömungen unterscheiden sich nicht gravierend von den restlichen Flecken, sodass eine Zunahme der Strömung mit steigender Ausdehnung der Fleckengröße ausgeschlossen werden konnte. Anschließend wurde festgestellt, ob ein Zusammenhang zwischen der Ausdehnung der Strömung und verschiedenen Parametern hergestellt werden kann. Hier stellte sich heraus, dass insbesondere die maximale Strömungsgeschwindigkeit eng mit der Ausdehnung der Strömung verknüpft ist. Ebenfalls wurde der Einfluss des photometrischen Radius auf die Ausdehnung der Strömung untersucht. Hierbei wurde ein Zusammenhang identifiziert, der jedoch nur einen moderaten Korrelationskoeffizienten aufwies.

# Kapitel 1

## Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, horizontale Strömungen innerhalb von Sonnenflecken näher zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden 27 Zeitserien von Sonnenflecken mit einer Dauer von 12 Stunden betrachtet, die mit Hilfe von Daten des Satelliten Solar Dynamics Observatory (SDO) erstellt wurden.

Zunächst wird im Rahmen dieser Arbeit einleitend die Geschichte der Sonnenforschung und die Sonne als Forschungsobjekt betrachtet. Im zweiten Kapitel werden die genutzten Instrumente vorgestellt, bevor im dritten Kapitel die relevanten Eigenschaften von Sonnenflecken aufgeführt und theoretische Grundlagen zum Thema gelegt werden. Der methodische Aspekt, sowie Verfahren und Durchführung der Datenanalyse, werden im vierten Kapitel behandelt. Abschließend werden im letzten Kapitel die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 1.1 Geschichte der Sonnenbeobachtung

Schon immer faszinierte die Menschheit die Sonne als Lebensspender und Lichtquelle. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Sonne in ihrer (scheinbaren) Einzigartigkeit eine große Rolle in der Kultur spielt. In vielen Kulturen wurde die Sonne sogar als Gottheit verehrt. Die regelmäßige, tägliche Wiederkehr und der jährliche Gang der Sonne wurde in diesem Sinne als Gotteswerk verklärt, beispielsweise ist die Spirale als astrales Symbol in allen bronze- und eisenzeitlichen Kulturkreisen vertreten (siehe [Hamel, 1998](#), Seite 15). Obwohl meine Masterarbeit kein Gotteswerk darstellen soll, sehe ich an dieser Stelle trotzdem gewisse Parallelen, da die tägliche Arbeit am Thema es mir ermöglichte, nach einem Jahr den Gang zum Prüfungsamt anzutreten.

Neben der kulturellen Einbindung wurde die Sonne auch als Instrument zur Zeitmessung verwendet. Zum Beispiel nutzten schon die Babylonier einen so genannten Gnomon<sup>1</sup> zur Einteilung des Tages in 12 Stunden. Infolgedessen wurden sogar in einigen Städten größere öffentliche Gebäude in bestimmten Himmelsrichtungen ausgerichtet, wie in der hethitischen Stadt Sarissa ([Müller-Karpe, Müller-Karpe und Schimpf, 2009](#)). Große Bedeutung gewann die Sonnenbeobachtung schon früh bei der Erstellung von Kalendern, die auf der Bewegung der Sonne basieren. Der Parapegma<sup>2</sup> ist beispielsweise für den Ackerbau von zentraler Bedeutung.

Versuche, solare Einflüsse auf die Erde zu ergründen, gab es schon zu frühen Epochen der Menschheit, sei es als wichtigstes Himmelsobjekt in einem System mit der Erde als scheinbares Zentrum, bis hin zu Überlegungen, die Sonne ins Zentrum unseres Universums zu rücken. Das erste heliozentrische System geht vermutlich auf Aristarchos von Samos im Jahre 280 v. Chr. zurück (siehe [van der Waerden, 1988](#), Seite 15). Jedoch wurden erste ernsthafte wissenschaftliche Untersuchungen erst mit der Entwicklung des Fernrohrs durch Hans Lipperhey im Jahre 1608 möglich (siehe [Hamel, 1998](#), Seite 188). Infolgedessen wurde auch schnell klar, dass unsere Sonne nicht einzigartig, sondern nur einer von vielen unzähligen Sternen in unserem Universum ist.

Auf Grund der neuen Instrumente war es nun möglich, einen detaillierten Blick auf die Sonne zu werfen.

---

<sup>1</sup>Bei einem Gnomon handelt sich um einen auf einer waagerechten Platte montierten senkrechten Stab. Die Länge und Richtung des Schattens gibt Auskunft über die Tageszeit ([van der Waerden, 1988](#), Seite 17).

<sup>2</sup>Ein Parapegma ist ein griechischer Steckkalender, der auf den Sonnenstand beruht ([van der Waerden \(1988, Seite 176\)](#))



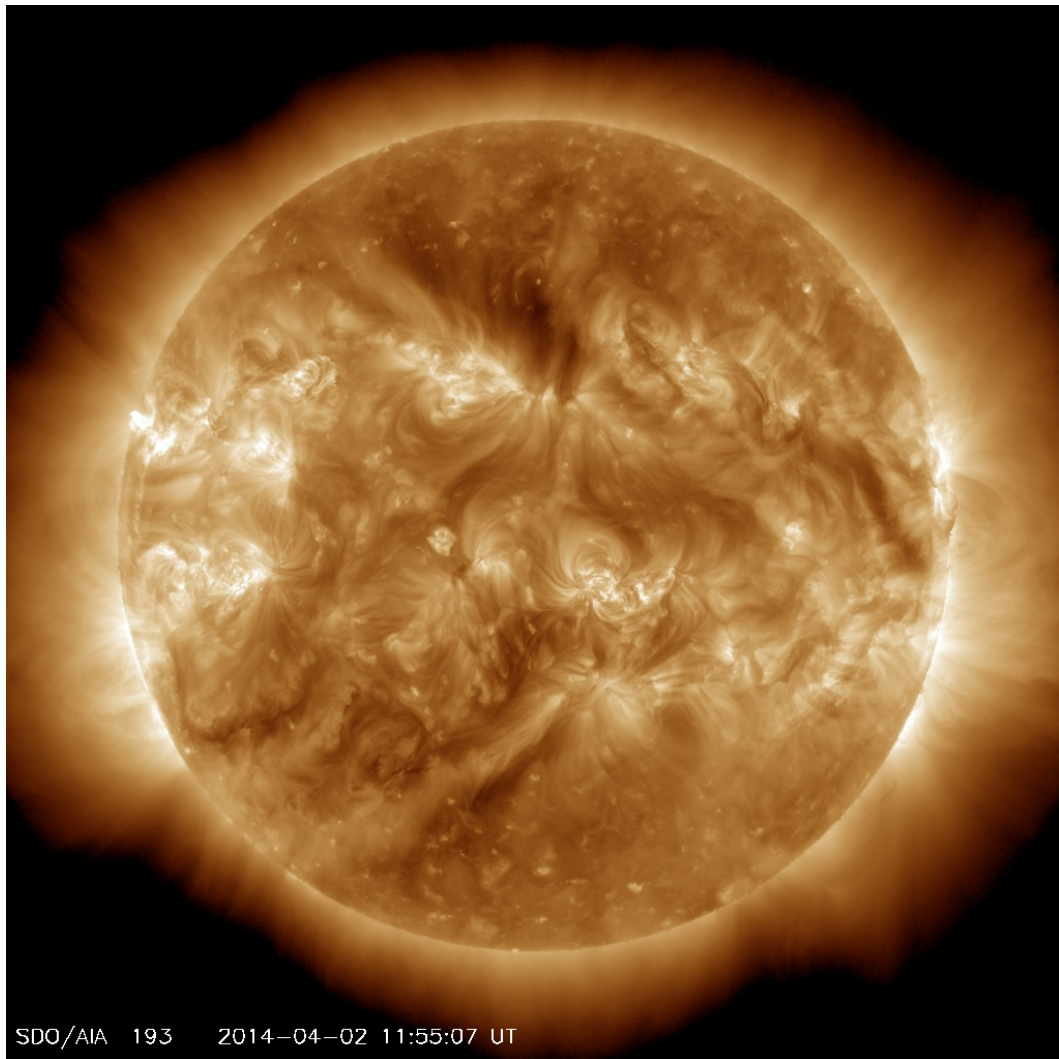
**Abbildung 1.1:** Das Sonnenobservatorium Einsteinturm bestehend aus dem Turmteleskop mit 63 cm Öffnung und einem langbrennweitigen Spektrografen.

Quelle: [www.aip.de/de/institut/locations/solar-observatory-einstein-tower](http://www.aip.de/de/institut/locations/solar-observatory-einstein-tower) am 7. Januar 2015

Schon zwei Jahre später gelang es vermutlich Thomas Harriot zum ersten Mal Sonnenflecken zu dokumentieren. Jedoch wurden sie auch von Johannes Fabricius, Christoph Scheiner und Galileo beobachtet (siehe [Hamel, 1998](#), Seite 185). Die ersten systematischen, täglichen Sonnenbeobachtungen erfolgten dann 1849 am Züricher Observatorium. Im Laufe der Zeit, war es Forschern aufgrund technischer Innovationen möglich, das Wissen und Verständnis über die Sonne immer weiter zu vertiefen. Schnell wurden auch erste Theorien über die Struktur der Sonne aufgestellt. Alexander Wilson mutmaßte, dass Sonnenflecken Vertiefungen in der Sonnenatmosphäre seien. Worauf William Herschel eine Theorie aufstellte, nach der die Sonne aus zwei Schichten bestehen müsste, d.h. ein fester nicht leuchtender Kern, der von einer leuchtenden Sphäre umgeben ist (siehe [Hamel, 1998](#), Seite 267). Zur Erklärung der Struktur und Atmosphäre der Sonne trugen namhafte Wissenschaftler wie Galileo Galilei, William Herschel, Joseph von Fraunhofer, Albert Einstein, Sir Arthur Eddington, Subrahmanyan Chandrasekhar und Hans Bethe bei, bis sich das heutige Bild der Sonne und des Universums herauskristallisierte ([Dick und Hamel, 2002](#)).

Ein besseres Verständnis der Sonne hat auch unmittelbare Auswirkungen auf weitere Fragen der Menschheit. In diesem Sinne wurde mit dem Einsteinturm (siehe [Abbildung 1.1](#)) in Potsdam auch ein Sonnen-teleskop konstruiert, um mit Hilfe von Messungen des Sonnenlichts, die von der Relativitätstheorie vorhergesagten Phänomene nachweisen zu können. Obwohl dieses ehrgeizige Ziel mit dem Einsteinturm nicht unmittelbar zu realisieren war, zeigt es doch die Bedeutung der Sonnenphysik für das Verständnis der Welt.

Heute ist es mit Hilfe von Sonnenbeobachtungssatelliten, wie dem eingangs erwähnten SDO, möglich, die Sonne kontinuierlich zu beobachten und zu vermessen. Aufgrund zahlreicher Beobachtungsmöglichkeiten ist man in der Lage, viele Aussagen über unseren Stern zu machen. Neben SDO bieten auch das Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) der NASA und der Satellit Hinode der japanischen Raumfahrtbehörde JAXA die Möglichkeit, die Sonne aus dem Weltraum heraus zu beobachten. Zusätzlich stehen auch eine Vielzahl von erdgebundenen Sonnentelestopen zur Verfügung. So kann das auf Teneriffa gebaute Sonnentelestok GREGOR durch seine adaptive Optik eine Auflösung von ca. 0,1'' erreichen ([Schmidt et al., 2012](#)), sodass Objekte von etwa 70 km Durchmesser auf der Sonne untersucht werden können.



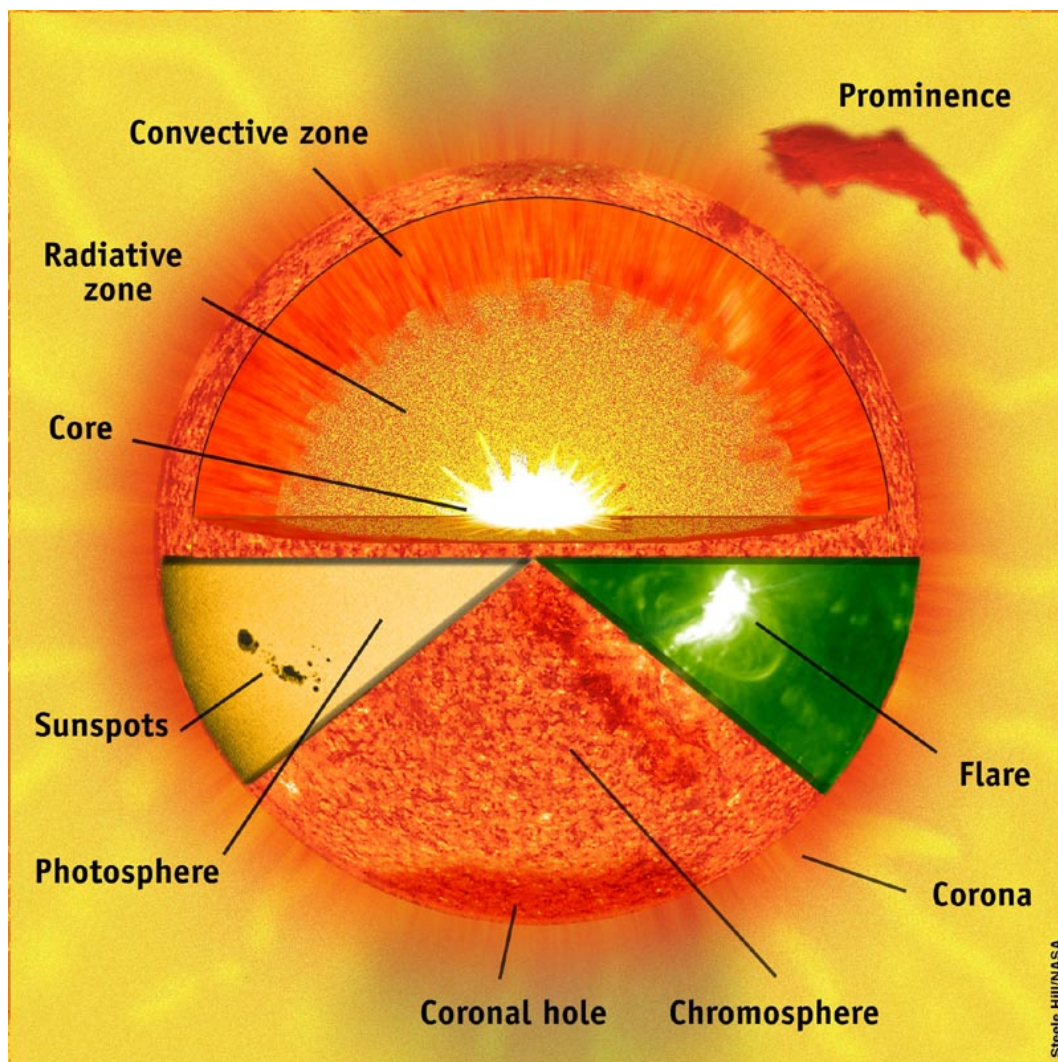
**Abbildung 1.2:** Sonnenaufnahme im extremen ultravioletten (EUV) Licht bei 193 nm, die mit dem Solar Dynamics Observatory am 2. April 2014 gemacht wurde. Zu sehen sind vor allem koronale Schleifen (engl. coronal loops) und magnetisch aktive Regionen.

Quelle: [sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/latest/latest\\_1024\\_0193.jpg](http://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/latest/latest_1024_0193.jpg) am 2. April 2014

## 1.2 Die Sonne

Die Sonne ist ein Stern der Spektralklasse G2V mit einer effektiven Oberflächentemperatur von 5780 K. Sie kann somit mitten in die Hauptreihe des Hertzsprung-Russel Diagramms eingeordnet werden. Mit einer Metallizität von 1,4% gehört sie zu der Sternpopulation I, der jüngsten und größten Population von Sternen. Abgesehen von der Nähe zur Erde, unterscheidet sich die Sonne nicht von anderen Sternen derselben Spektralklasse.

Da die Sonne aufgrund ihrer Nähe zur Erde der am besten untersuchte Stern ist, dient sie als Vorlage für sämtliche theoretische Sternmodelle. Von besonderen Interesse sind zyklisch auftretende Erscheinungen der Sonne. Diese zeigen uns, dass die Sonnenoberfläche alles andere als ruhig ist. Zu diesen Aktivitäten gehören sogenannte Flares (Plasma- und Strahlungsausbrüche), Änderungen im Sonnenwind, Sonnenstürme, die Gasfontänen der Protuberanzen und auch Sonnenflecken. Hervorgerufen werden diese Effekte durch das an einigen Stellen herrschende, starke Magnetfeld der Sonne von etwa 2–3 kG in einigen Fällen sogar 4 kG (1 kG (Kilogauss) = 0,1 T), wobei das mittlere Magnetfeld der Sonne nur etwa 1 G beträgt. Im Vergleich dazu beträgt das Magnetfeld der Erde am Äquator lediglich 0,3 G. Das Magnetfeld der Sonne ist jedoch nicht homogen. Stattdessen erscheint es in Flussröhren. Diese treten senkrecht zur Oberfläche in der Photosphäre auf und sind über die ganze Sonne verteilt (Unsöld und Baschek, 1988). Aufgrund dieser Aktivitäten hat die Sonne auch großen Einfluss auf die Erde. Dieses Phänomen nennt man Weltraumwetter. Es wird durch heftige Explosionen in der Sonnenatmosphäre (Flares, Eruptionen



**Abbildung 1.3:** Die Sonne besteht aus mehreren Schichten, von innen nach außen sind das: Sonnenkern, Strahlungszone, Konvektionszone, Chromosphäre, Photosphäre und Korona. Außerdem sind noch Sonnenflecken (linke Seite) und Flares (grüner Ausschnitt) als Beispiele der Sonnenaktivität dargestellt. Zusätzlich werden noch Materieausstöße in Form einer Protuberanz (engl. prominence) und ein koronales Loch veranschaulicht.

Quelle: [www.cnes.fr/imagezoom.php?file=p5schema\\_soleil.jpeg](http://www.cnes.fr/imagezoom.php?file=p5schema_soleil.jpeg) am 19. Mai 2014

von Filamenten/Protuberanzen und koronalen Massenauswürfen) verursacht. Sowohl Ströme elektrisch geladener Teilchen (der Sonnenwind), als auch koronale Massenauswürfe tragen Milliarden von Tonnen an Sonnenmaterial in den interplanetaren Raum. Doch während die Materieteilchen von koronalen Massenauswürfen (engl. coronal mass ejection, CME) meist einige Tage brauchen, um den erdnahen Raum zu erreichen, bewegen sich elektrisch geladene Teilchen und die Sonnenstrahlung ungleich schneller. Elektronen von CMEs brauchen etwa 30 min von der Sonne zur Erde, während die 2000-mal schwereren Protonen etwa 36–60 Stunden brauchen. Dadurch dauert es nur Minuten von einem Massenauswurf bis zum ersten Auftreffen auf die Magnetosphäre der Erde. Besonders betroffen von den schädlichen Sonneneinflüssen sind der erdnahe Weltraum und die Polgebiete der Erde. Dies betrifft insbesondere Satelliten, aber auch technische Einrichtungen auf der Erde. Außerdem ist das Weltraumwetter verantwortlich für das Polarlicht und Störungen der Ionosphäre, die die Ausbreitung von Radiowellen in der Erdatmosphäre behindern.

Im Inneren der Sonne herrscht ein hydrostatisches Gleichgewicht, d.h. Gas- und Gravitationsdruck sind im Gleichgewicht. Die Sonne ist somit keine homogene Gaskugel. Sie besteht aus mehreren Schichten, die hinsichtlich von Dichte und Temperatur unterschiedlich sind. Im Zentrum der Sonne erstreckt sich der Kern (siehe Abbildung 1.3), mit einem Viertel des Sonnenradius macht der Kern lediglich 1/64 des Volumens aus, beinhaltet jedoch die Hälfte der Gesamtmasse. Dieses Phänomen lässt sich mit der hohen Dichte von  $150 \text{ g cm}^{-3}$  erklären. Das dichteste auf der Erde vorkommende natürliche Element Osmium



hat im Vergleich eine Dichte von lediglich  $22,6 \text{ g cm}^{-3}$ . Sämtliche Energie der Sonne wird im Kern durch Kernfusionsprozesse erzeugt, hierbei handelt es sich vor allem um die Proton-Proton-Kette, die für Sterne mit der Masse der Sonne dominiert. Dabei verschmelzen vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern. Die andere Form des Wasserstoffbrennens, der Bethe-Weizsäcker-Zyklus, spielt mit einem Anteil von 1,6% nur eine untergeordnete Rolle, da dieser Prozess erst ab einer Temperatur von über 14 Millionen Kelvin einsetzt und nur direkt im Zentrum der Sonne, wo Temperaturen von etwa 15 Millionen Kelvin herrschen. Bei diesem Prozess sind die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) beteiligt und wirken als Katalysator für die Wasserstofffusion, weshalb man auch vom CNO-Zyklus redet. Der Kern wird von der Strahlungszone und Konvektionszone umschlossen. Die Strahlungszone hat eine signifikant niedrigere Dichte und Temperatur, sodass hier keine Fusionsreaktionen mehr stattfinden können. Die im Kern durch die Fusionsprozesse erzeugten hochenergetischen Photonen wechselwirken mit Elektronen und Ionen, sodass Strahlung z.B. in Form von Gammastrahlung erzeugt wird. Anschließend folgt die Konvektionszone, die bei einem Abstand zum Zentrum von etwa 500.000 km beginnt. Hier ist die Temperatur bereits auf etwa 2 Millionen Kelvin gesunken, sodass die Rekombination der ionisierten Atome einsetzt. Allerdings sind die Hauptbestandteile der Sonne, Wasserstoff und Helium, immer noch vollständig ionisiert. Wie der Name es schon suggeriert, ist diese Schicht durch Konvektionsbewegungen gekennzeichnet, da Strahlung als Energietransportmechanismus nicht mehr effizient genug ist. Diese Zirkulationsströme sind auch der Grund für die Granulation der Sonnenoberfläche.

Das sichtbare Licht stammt jedoch zum überwiegenden Teil aus der darüber liegenden Photosphäre, da hier die Dichte und damit die Opazität soweit gesunken ist, dass Photonen in den Weltraum abgestrahlt werden können. Bis zu dieser Höhe nimmt die Temperatur stetig ab. In der darüber liegenden Chromosphäre erfolgt jedoch ein chromosphärischer Heizprozess, sodass die Temperatur wieder zunimmt. Der Grund für diesen Heizprozess ist jedoch noch nicht eindeutig bestimmt worden. Charakteristisch für diese Schicht sind außerdem die im Licht der Wasserstofflinie  $H\alpha$  sichtbaren Spikulen. Diese sind röhrenhafte Strukturen, die wahrscheinlich durch magnetische Flussröhren hervorgerufen werden und die von der Granulation hin- und hergestoßen werden. Die dabei entstehenden magneto-akustischen Wellen könnten ein Grund für die Aufheizung der Chromosphäre sein.

Umhüllt wird die Sonne von der Korona, die jedoch keine scharfe Grenze besitzt, sondern kontinuierlich in die Umgebung übergeht. Sie kann besonders gut bei Sonnenfinsternissen beobachtet werden, wenn der Mond vor die Sonnenscheibe tritt. Die nicht klar gezogene Grenze zwischen Sonne und interstellarem Raum lässt auch ihre genaue Größe je nach Definition schwanken. Im sichtbaren Bereich des Lichts wird der Sonnenradius zu 696.342 km bestimmt (Stix, 2004; Lang, 2001). Für solche Messungen werden Beobachtungsmöglichkeiten wie z.B. SDO herangezogen.

## Kapitel 2

# Solar Dynamics Observatory

Das Solar Dynamics Observatory (SDO) ist ein Sonnenforschungssatellit, der im Rahmen des Living With a Star (LWS) Programms der NASA betrieben wird. Dieses Projekt nimmt eine Vielzahl von verschiedenen Messdaten auf, die es ermöglichen, Auskünfte über Magnetfeld, Sonnenaktivität und sonstige Erscheinungen der Sonne zu geben. Ein weiteres Ziel ist es, den Einfluss der Sonne auf das Leben auf der Erde und alle anderen Objekte im Sonnensystem zu untersuchen. Dies erfordert auch die Erforschung des Weltraumwetters, welches unter anderem zu Ausfällen von Satelliten und Störungen von Kommunikationssignalen führen kann (Pesnell, Thompson und Chamberlin, 2012). SDO tritt damit die direkte Nachfolge der ebenfalls noch aktiven Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) Raumsonde an. Weitere noch aktive Satelliten, welche die Sonne aus dem Weltraum untersuchen, sind das Solar TERrestrial RElations Observatory (STEREO, Kaiser *et al.*, 2008) und das japanische Weltraumteleskop Hinode (Higgins *et al.*, 2011). Die erste Mission untersucht die Wechselwirkungen der Teilchenausbrüche und elektromagnetische Felder mit der Magnetosphäre der Erde, während die zweite Mission die Wechselwirkungen zwischen dem Magnetfeld der Sonne und der Sonnenkorona ergründet (Higgins *et al.*, 2011).

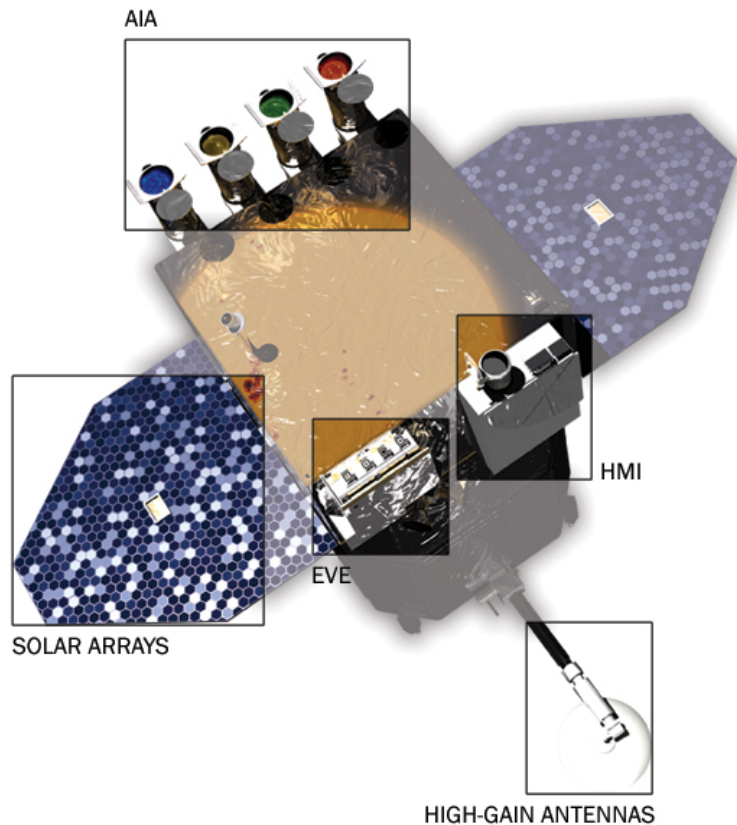
### 2.1 Fakten zum Forschungssatelliten

Am 11. Februar 2010 wurde SDO vom Kennedy Space Center mit einer Atlas-V-Rakete gestartet und befindet sich auf einer geneigten Bahn in 36.000 Kilometern Höhe. Der Satellit ist in drei Achsen stabilisiert, auf die Sonne ausgerichtet und soll mindestens fünf Jahre aktiv sein, wobei eine Missionsdauer entsprechend eines Sonnenfleckenzyklus von 11 Jahren angestrebt wird. Der in Abbildung 2.1 gezeigte Satellit hatte beim Start eine Gesamtmasse von 3000 kg. Davon sind nur 300 kg wissenschaftliche Instrumente, während der Hauptteil von 1400 kg aus Treibstoff besteht. Die 6,6 Quadratmeter großen Sonnensegel können eine elektrische Leistung von 1500 W erzeugen, was einer Effizienz von 16% entspricht.

Mit Hilfe von zwei Antennen (siehe Abbildung 2.1) werden die gemessenen wissenschaftlichen Daten über eine Hochgeschwindigkeitsfunkverbindung mit 130 Megabit pro Sekunde im Ka-Band bei 26 GHz übertragen. Betriebsdaten werden über das S-Band übermittelt. Dabei sendet SDO seine Daten nur bei Überflügen über White Sands, New Mexico, USA. Dort steht eine speziell für die SDO-Mission gebaute Bodenstation mit zwei redundanten 18-Meter-Antennen, die die Daten empfängt. Unterstützt wird die NASA Mission durch ein deutsches Datenzentrum am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Göttingen. Hier werden die Rohdaten komprimiert und weiterverarbeitet. Das MPS erzeugt aus den Rohdaten detaillierte Karten der Strömungen im Sonneninneren, dreidimensionale Karten des koronalen Sonnenmagnetfeldes und aktuelle Tabellen der Gesamthelligkeit der Sonne. Diese Datenprodukte werden später weltweit zur Verfügung gestellt. Beteiligt sind ferner das Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) und das Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik (KIS) in Freiburg<sup>3</sup> (Pesnell, Thompson und Chamberlin, 2012).

---

<sup>3</sup> [www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-6221/10233\\_read-22471](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-6221/10233_read-22471)



**Abbildung 2.1:** Die Raumsonde SDO besteht aus den drei Instrumenten Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), Atmospheric Imaging Assembly (AIA) und Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE), den Hochleistungsantennen sowie Solarzellen zur Stromversorgung.

Quelle: [www.nasa.gov/images/content/424360main\\_Pesnell\\_1\\_large.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/424360main_Pesnell_1_large.jpg) am 19. Mai 2014

## 2.2 Instrumente

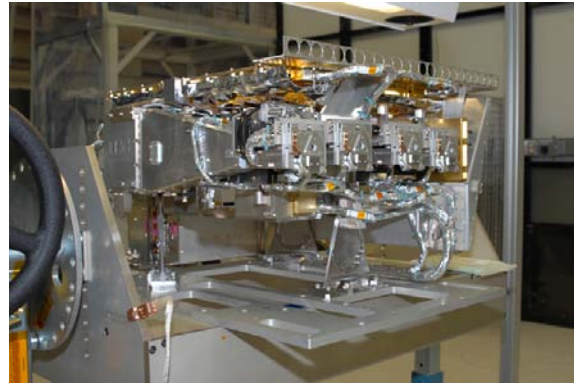
Zur Beobachtung der Sonne stehen drei verschiedene Instrumente zur Verfügung: (1) Atmospheric Imaging Assembly (AIA), (2) Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) und (3) Helioseismic and Magnetic Imager (HMI). Die einzelnen Instrumente sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Daten der bildgebenden Instrumente HMI und AIA werden durch das Joint Science Operations Center (JSOC) zusammen ausgewertet und kalibriert.

### 2.2.1 Atmospheric Imaging Assembly

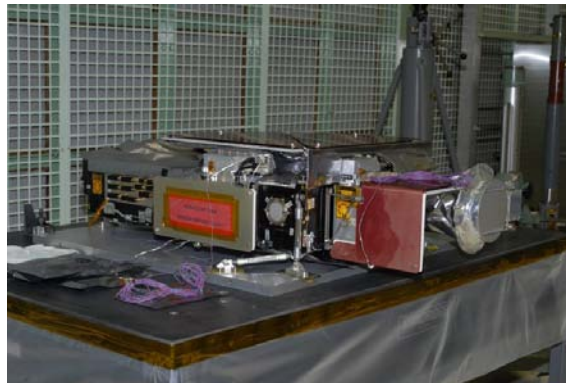
Bei diesem Instrument handelt es sich um eine Anordnung von vier verschiedenen Teleskopen, die die Oberfläche und Atmosphäre der Sonne beobachten. Filter erlauben es, zehn verschiedene Wellenlängenbereiche zu betrachten, die Temperaturbereichen von 6000 K bis  $3 \times 10^6$  K entsprechen. Mit sieben verschiedenen Wellenlängen liegt der Beobachtungsschwerpunkt im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich (100–1220 Å), in welchem vor allem in der Korona erzeugte Photonen detektiert werden. Der ultraviolette Bereich wird mit zwei weiteren Filtern (1600 und 1700 Å) und der sichtbare mit einem Filter (4500 Å) abgedeckt. Je nach Wellenlänge kann in verschiedene Tiefen der Sonne und somit in mehrere Atmosphärenschichten mit jeweils charakteristischen Temperaturen geschaut werden (siehe Tabelle 2.1). AIA ermöglicht es, alle 12 Sekunden Bilder des 1,3-fachen Sonnendurchmessers aufzunehmen, die eine räumliche Auflösung von ungefähr einer Bogensekunde haben. Das Aufnahmeintervall richtet sich dabei nach der Wellenlänge, so beträgt diese für 94–335 Å 12 Sekunden, jedoch für 4500 Å 12 Minuten (Lemen *et al.*, 2012).



(a) AIA



(b) EVE



(c) HMI

**Abbildung 2.2:** SDO ist mit drei Instrumenten ausgestattet: (1) die Atmospheric Imaging Assembly (AIA) besteht aus vier Teleskopen die einen Bereich vom extrem Ultravioletten bis hin zum sichtbaren Licht abdecken; (2) das Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) vermisst das Sonnenspektrum im Bereich von 0,1 bis 105 nm; (3) der Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) verzeichnet Geschwindigkeits- und Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche

Quelle: [www.nasa.gov/mission\\_pages/sdo/spacecraft](http://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/spacecraft) am 19. Mai 2014

Je nach Bearbeitungsgrad unterscheidet man in der weiteren Bildverarbeitung verschiedene Level (De-Rosa und Slater, 2013):

- Level 0 beinhaltet Bilder, die aus den Rohdaten bestehen.
- Level 1.0 Bilder wurden aus Level 0 Daten konvertiert und beinhalten erste Korrekturen wie das Entfernen von „Hot Pixel“ und durch die kosmische Strahlung hervorgerufenen Artefakten sowie den Ausgleich der unterschiedlichen Empfindlichkeit einzelner Pixel auf der CCD (engl. flat-fielding).
- Level 1.5 Bilder wurden auf einen Bildmaßstab von 0,6'' pro Pixel skaliert, zentriert und mit Metadaten versehen, die eine weitere, standardisierte Verarbeitung und Archivierung ermöglichen.

## 2.2.2 Extreme Ultraviolet Variability Experiment

EVE misst die Änderungen der extrem ultravioletten (EUV) Strahlung und der weichen Röntgenstrahlung während einer Sonneneruption, der Sonnenrotation und des Sonnenzyklus. In diesem Zusammenhang wird das Sonnenspektrum im Bereich von 0,1–105 nm untersucht. Dabei wird eine moderate spektrale Auflösung von 0,1 nm und eine zeitliche Auflösung von 10 s erreicht. EVE besteht aus drei Teilen: (1) Multiple Extreme ultraviolet Grating Spectrograph (MEGS), (2) Solar Aspect Monitor (SAM) und (3) EUV SpectroPhotometer (ESP). Im ersten Fall kombiniert MEGS Gitterspektrometer mit zwei CCD

Filter	Primäre Ionen	Region der Atmosphäre	Char. log $T$ in K
4500 Å	Kontinuum	Photosphäre	3,7
1700 Å	Kontinuum	Photosphäre	3,7
304 Å	He II	Chromosphäre, Übergangsregion	4,7
1600 Å	C IV	Übergangsregion, obere Photosphäre	5,0
171 Å	Fe IX	ruhige Korona, obere Übergangsregion	5,8
193 Å	Fe XIV; XXIV	Korona	6,1; 7,3
211 Å	Fe XIV	Korona aktiver Regionen	6,3
335 Å	Fe XVI	Korona aktiver Regionen	6,4
94 Å	Fe XVIII	Strahlungsausbrüche	6,8
131 Å	Fe VIII; XX, XXII	Strahlungsausbrüche	5,6; 7,0; 7,2

**Tabelle 2.1:** Die zehn verschiedenen Filter von AIA decken bestimmte Wellenlängenbereiche von 13,1 nm bis ins sichtbare Licht ab. Auf den extremen ultravioletten Wellenlängenbereich (10–122 nm) wird hierbei ein Schwerpunkt gesetzt. Zu jeder Wellenlänge werden die hauptsächlich gemessenen Ionen, die Atmosphärenschichten und die jeweilige charakteristische Temperaturen angegeben.

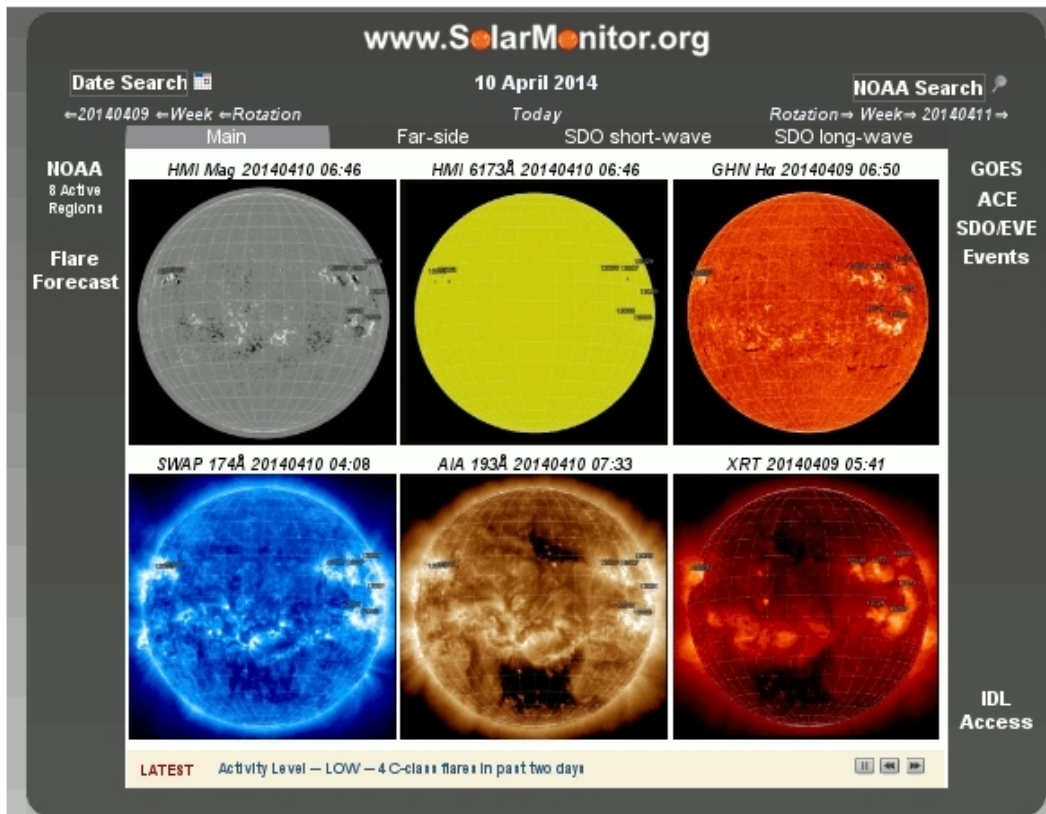
Detektoren, um den Strahlungsfluss in verschiedenen Wellenlängenbereichen zu bestimmen. MEGS-A misst bei streifendem Einfall von 5–37 nm, MEGS-B bei senkrechtem Einfall von 35–105 nm und bei 121,6 nm mit einer spektralen Auflösung von 0,1 nm. Zusätzlich können mit SAM, einer Lochblendenkamera, einzelne Röntgenphotonen im Wellenlängenbereich von 0,1–7 nm mit dem MEGS-A CCD betrachtet werden. Das EUV Spectrophotometer besteht aus einer Reihe von Radiometern, die hinter einem Transmissionsgitter angeordnet sind und im Bereich von 0,1–39 nm detektieren. Es ist eine Weiterentwicklung des Solar EUV Monitor (SEM) auf SoHO. Die CCD Kameras in EVE nutzen strahlungsresistente 1024×2048-Pixel CCDs mit einer hohen Sensitivität im EUV Bereich ([Woods et al., 2012](#)).

### 2.2.3 Helioseismic and Magnetic Imager

Der Helioseismic and Magnetic Imager ist eine Weiterentwicklung des Michelson Doppler Imager (MDI) auf SoHO. Das Instrument bestimmt Geschwindigkeits- und Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche. Ziel ist es, die Dynamik der Konvektionszone, den Ursprung und die Entwicklung von Sonnenflecken, aktiven Regionen, solaren Magnetfeldern sowie die Anzeichen von Sonnenaktivitäten zu untersuchen. Hierzu wird die Sonne bei einer Wellenlänge von 617,3 nm betrachtet. Die Dopplergeschwindigkeit kann HMI auf der gesamten Sonnenscheibe mit einer Auflösung von einer Bogensekunde darstellen. Außerdem wird der magnetische Fluss alle 45 Sekunden aufgezeichnet und das Vektormagnetfeld alle 90 oder 135 Sekunden, je nach ausgewählter Bildrate. Das so erstellte Magnetogramm füllt die 4096 × 4096 Pixel der beiden CCD-Kameras nahezu vollständig aus und kann mit einer Auflösung von 0,5'' pro Pixel dargestellt werden. Die kontinuierliche Datenspeicherrate liegt bei 55 Mbits/s ([Schou et al., 2012](#); [DeRosa und Slater, 2013](#)).

Ähnlich wie bei AIA gibt es auch beim HMI verschiedene Bearbeitungsgrade:

- Level 0 ähnlich wie AIA Level 0
- Level 1.0 Bilder wurden ebenfalls aus den Level 0 Daten berechnet und beinhalten auch erste Korrekturen wie die Entfernung von gestörten Pixeln, despiking und flat-fielding. Desweiteren wurden sie einer Qualitätskontrolle unterzogen. Die Änderungen sind jedoch reversibel.



**Abbildung 2.3:** Ansicht der Solarmonitor Webseite vom 10. April 2014. Zu sehen sind aktuelle Sonnenbilder mit einer Auswahl von verschiedenen Darstellungen und Zugriff auf das Bilderarchiv. Von links oben nach unten recht sind folgende Sonnenbilder abgebildet: HMI Magnetogramm, Kontinuumbild, H $\alpha$  Filtergramm vom Global High Resolution H $\alpha$  Network, Bild der Korona aufgenommen mit dem Sun Watcher with APS detectors and image Processing (SWAP) bei 17,4 nm, AIA 19,3 nm Bild der Korona und eine Aufnahme mit dem XRT Instrument der Sonde Hinode.

Quelle: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org) am 10. April 2014

- Level 1.5 Bilder sind physikalische Beobachtungen wie Dopplergramme, Magnetogramme und Kontinuumbilder, die aus den jeweiligen Level 1.0 Filtergrammen gewonnen wurden.
- Level 2.0 enthält Bilder, die endgültig und irreversibel korrigiert wurden.

## 2.3 SolarMonitor

Als nützliches Hilfsmittel zur Vorbetrachtung hat sich die Webseite [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org) erwiesen. Sie wird von der Solar Physics Group des Trinity College Dublin und der Irish National e-Infrastructure (e-INIS) betrieben. Gefördert wird das Projekt durch das Programme de Développement d'Expériences Scientifiques der ESA, kurz PRODEX, und mit Hilfe von dem 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Kommission. Auf dieser Plattform werden aktuelle Sonnendaten übersichtlich präsentiert (siehe Abbildung 2.3). Hierzu stehen sowohl Bilder als auch unterschiedliche Darstellungen (wie Magnetogramme) in verschiedenen Wellenlängen zur Verfügung. Desweiteren sind alle Sonnenflecken mit Identifikationsnummern wie auch Klassifikationen nach verschiedenen Modellen versehen.

## Kapitel 3

# Sonnenflecken

Im Unterschied zu anderen Phänomenen der Sonnenaktivität, die einen Entropiezuwachs erzeugen, zeichnen sich Sonnenflecken durch eine vergleichsweise geordnete Struktur aus. Insbesondere der innere Teil eines Sonnenflecks weist eine geringere Entropie als die Umgebung auf. Eine weitere Eigenschaft stellt die, in Bezug auf die photosphärische Granulation, lange Lebensdauer der hellen umbralen Punkte (engl. umbral dots) in Sonnenflecken dar. Das macht Sonnenflecken zu geeigneten Kandidaten für die Analyse der Sonnenatmosphäre ([Gurman, 1992](#)).

Die auffälligste Eigenschaft eines Sonnenflecks (zu sehen in [Abbildung 3.1](#)) ist das starke Magnetfeld (2–3 kG;  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ Tesla}$ ), welches in der Umbra vertikal zur Sonnenoberfläche verläuft und in der Penumbra stärker geneigt ist. Sonnenflecken sind Phänomene der Photosphäre, die als dunkle Flecken auftreten. Der Grund für ihre dunklere Erscheinung liegt in der geringen Temperatur. Diese ist bis zu 1500 K kühler als die durchschnittliche Temperatur von 5780 K in der ruhigen Photosphäre.

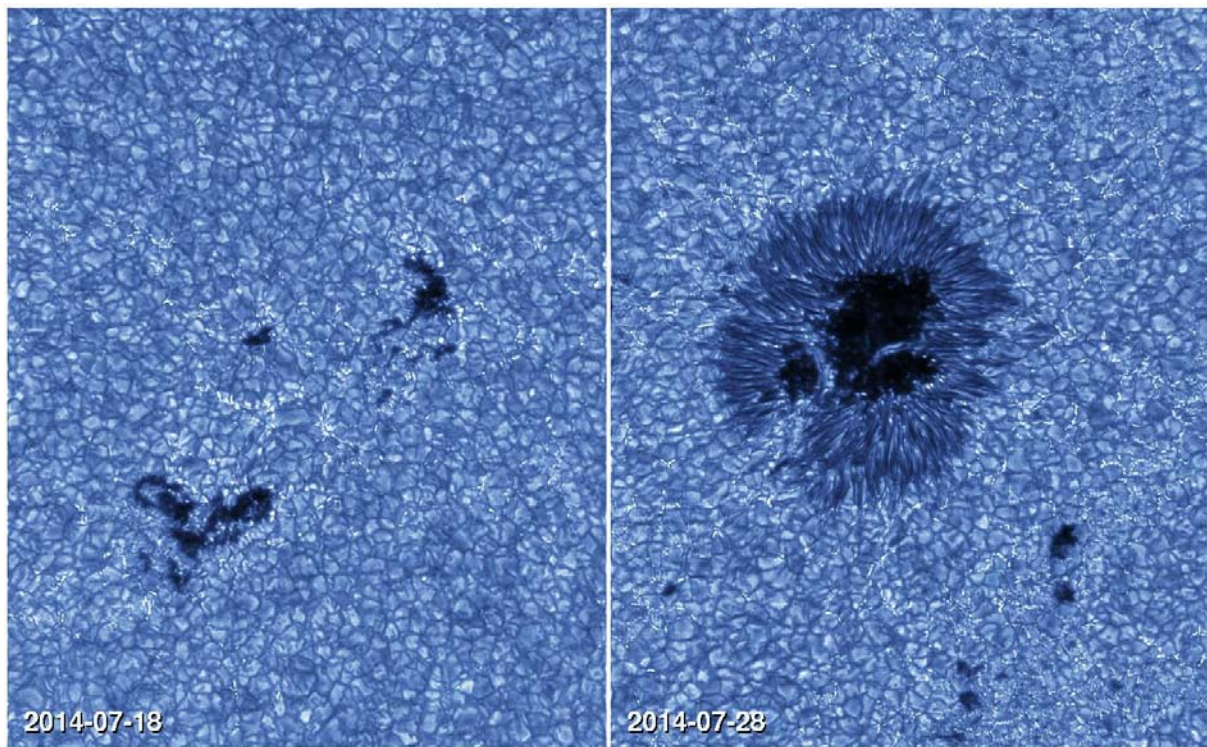
Desweiteren ist zwischen dem inneren schwarzen Fleck, der Umbra, und der umgebenden Region, der Penumbra, zu unterscheiden. In der Nähe der Sonnenflecken befinden sich oft Fackeln, die etwa 100 K heißer als die Umgebung sind und somit heller erscheinen. Dieser Effekt wird jedoch nur nahe des Sonnenrandes deutlich, da die magnetische Flussröhre unter einem Winkel betrachtet wird, sodass es der geringere Gasdruck in der Flussröhre ermöglicht, tiefer in die heißeren Atmosphärenschichten zu schauen. Um diese enormen Temperaturdifferenzen besser zu verstehen, müssen wir die Entstehung von Sonnenflecken näher betrachten ([Weigert, Wendker und Wisotzki, 2012](#); [Solanki, 2003](#)).

### 3.1 Struktur eines Sonnenflecks

#### 3.1.1 Umbra

Die Umbra eines Sonnenflecks erscheint nur auf dem ersten Blick als dunkler Fleck. Bei genauer Betrachtung und mit besserer Auflösung erkennt man jedoch, dass die Umbra noch andere Bestandteile enthält (siehe [Abbildung 3.2](#)). Der dunkle Kern bedeckt 10–20% der Umbrafläche und hat eine Größe von  $2,3\text{--}2,9''$  (siehe [Bray und Loughhead, 1964](#), Seite 87) bei einer Temperatur von 3500 K. Der dunkle Kern erzeugt nur eine Intensität von 5–30% der normalen Sonnenoberfläche (engl. quiet Sun). Außerdem enthält die Umbra kleine helle Punkte die ungefähr 3–10% der Umbra ausmachen. Sie werden umbrale Punkte (engl. umbral dots) genannt und haben eine Lebenszeit von 3–80 min. Dabei unterscheidet man zwischen zentralen umbralen Punkten und solchen an der Peripherie der Umbra, d.h. am Übergang zur Penumbra. [Grossmann-Doerth, Schmidt und Schroeter \(1986\)](#) fanden heraus, dass beide Arten einen Durchmesser von  $0,4\text{--}0,9''$  aufweisen. Diese kleinen Aufhellungen sind 700–1000 K heißer als der dunkle Kern und erscheinen somit heller. Außerdem weisen sie ein im Verhältnis zur umgebenden Umbra schwächeres Magnetfeld auf.

In der Umbra sind jedoch auch weitere hellere Strukturen sichtbar, die sogenannten Lichtbrücken (engl. light-bridges). Das sind helle längliche Strukturen, die annähernd die Intensität der ruhigen Sonne erreichen. Oft sind sie ein Anzeichen für die Auflösung eines Sonnenflecks ([Sobotka, Bonet und Vazquez, 1993](#)).



**Abbildung 3.1:** G-Band Bilder von einem bipolaren Gebiet mit Poren (links) und einem Sonnenfleck (rechts) mit ausgeprägter Umbra, der nahezu vollständig von einer Penumbra umgeben ist. Ebenfalls zu erkennen sind helle Lichtbrücken, die den Sonnenfleck durchqueren. Umgeben wird der Sonnenfleck von der Granulation, einem Netzwerk von kleinskaligen Aufhellungen (engl. G-band bright points) und einzelnen dunklen Poren.

Quelle: [www.aip.de/de/aktuelles/personnel-and-prizes/solare-Magnetfelder](http://www.aip.de/de/aktuelles/personnel-and-prizes/solare-Magnetfelder) am 17. November 2014

### 3.1.2 Penumbra

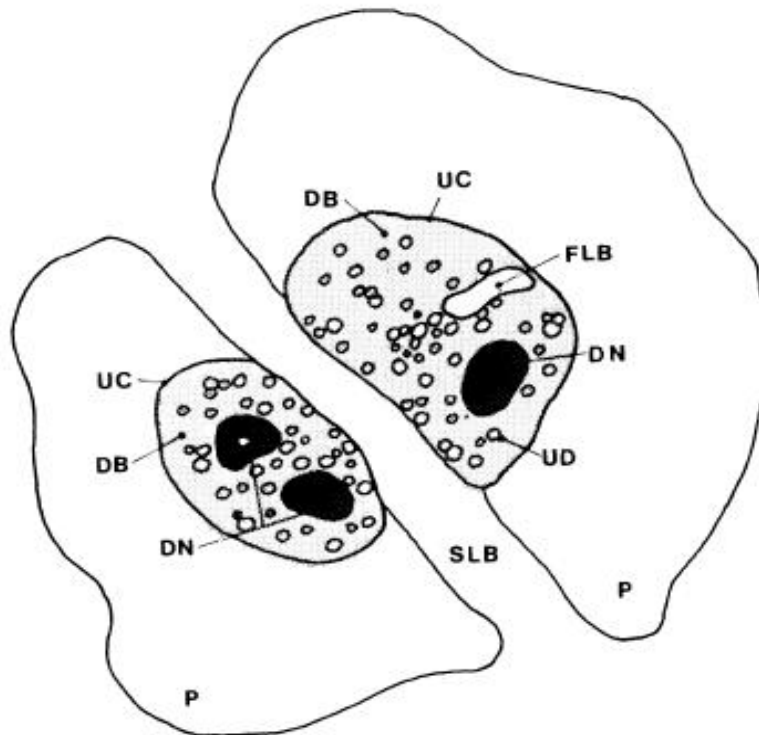
Um die Umbra herum verläuft in der Regel eine etwas hellere Region, die Penumbra. Diese ist etwa 500 K kühler als die ruhige Sonne und erscheint somit dunkler als die Umgebung, jedoch heller als die Umbra. Die Struktur der Penumbra wird durch Filamente bestimmt. Diese verlaufen radial von der Umbra zur umgebenden Granulation. Am inneren Ende dieser filamentartigen Strukturen befinden sich häufig kometenähnliche Aufhellungen (engl. penumbral grains), die sich nach Innen bewegen, wobei sie am Übergang Umbra-Penumbra nicht mehr von umbralen Punkten zu unterscheiden sind. Zwischen den Filamenten befinden sich Fibrillen, deren Helligkeit eher der Umbra entspricht. Das Magnetfeld der Penumbra ist zum Rand hin zunehmend geneigt und verläuft schließlich fast parallel zur Oberfläche (Sobotka, Bonet und Vazquez, 1993).

## 3.2 Entstehung

Grundsätzlich ist für die Entstehung eines Sonnenflecks das Magnetfeld der Sonne verantwortlich, welches durch Hale (1908) entdeckt und gemessen wurde. Die Sonne rotiert nicht einheitlich um ihre eigene Achse, stattdessen dreht sie sich am Äquator schneller als an den Polen. Die Rotationsgeschwindigkeit ist somit von der heliografischen Breite abhängig. Dieser Effekt wird als differentielle Rotation bezeichnet, wobei die Winkelgeschwindigkeit ebenfalls vom radialen Abstand vom Zentrum abhängt. Die differentielle Rotation lässt sich jedoch nicht auf die gesamte Sonne anwenden, da der innere Teil der Sonne nahezu konstant mit einer Rotationsgeschwindigkeit von ca. 435 nHz rotiert (Stix, 2004). Erst ab einem Radius von  $r = 0,7R_{\odot}$  existiert eine Übergangsregion mit einer Dicke von etwa  $\Delta r \approx 0,1R_{\odot}$ , bei der die differentielle Rotation einsetzt. Diese Region wurde von Spiegel und Zahn (1992) Tachocline genannt. Das hat zur Folge, dass es zwei Bereiche gibt, die einen starken Gradienten der Winkelgeschwindigkeit haben.

Wie man in der Abbildung 3.3 erkennen kann, führt die differentielle Rotation dazu, dass aus einem poloidalen (Feldlinien verbinden Nord und Südpol) ein toroidales (Auslenkung der Feldlinien in azimuthale

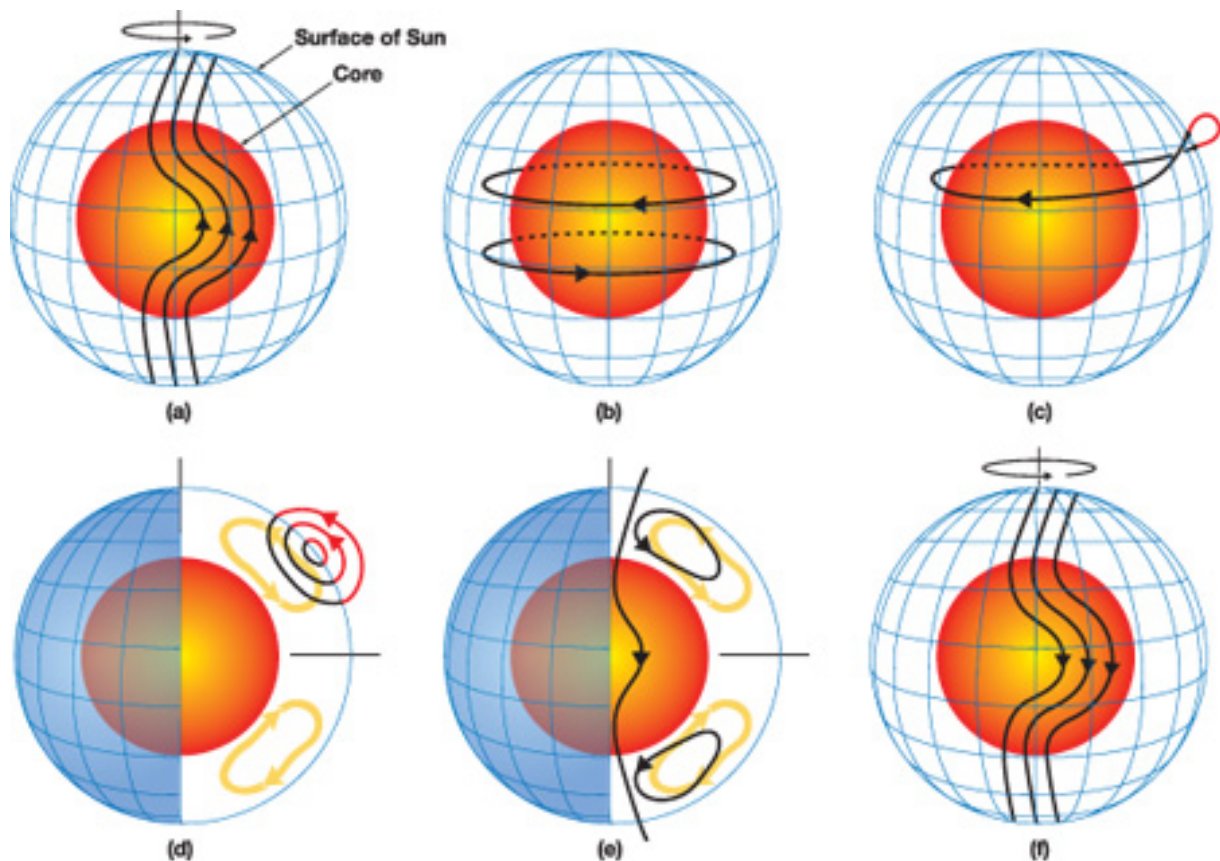




**Abbildung 3.2:** Schematisches Bild der Zusammensetzung der Umbra. P: Penumbra, U: Umbra, SLB: starke Lichtbrücke (engl. strong light-bridge), FLB: schwache Lichtbrücke (engl. faint light-bridge), UD: umbrale Punkte, DB: diffuser Hintergrund (engl. diffuse background) und DN: dunkler Kern (engl. dark nucleus) (Abbildung 1 aus [Sobotka, Bonet und Vazquez, 1993](#)).

Richtung) Magnetfeld wird. Eine Beeinflussung dieser Art des Magnetfeldes beeinträchtigt die Konvektion, also den Energietransport in der Konvektionszone. Wenn die parallel zum Äquator liegenden magnetischen Flussröhren gestört werden, bekommen sie Auftrieb und steigen vom Inneren der Sonne auf. In der Folge führt dies dazu, dass weniger Energie in Form von aufsteigenden, heißen Plasmablasken zur Sonnenoberfläche gelangt und somit die Temperatur um etwa 1500 K abnimmt. Zunächst bildet sich an der Stelle des Durchstoßpunktes des gestörten Magnetfeldes ein kleiner Fleck, eine sogenannte Pore mit einem Durchmesser von etwa 2–5'' ([Bray und Loughhead, 1964](#)). Aus dieser kann dann ein Sonnenfleck oder eine Fleckengruppe mit einer durchschnittlichen Fläche von 250  $\mu\text{H}$  ( $\mu\text{H}$  = Mikrohemisphären = Millionstel der sichtbaren Hemisphäre der Sonne) entstehen ([Bray und Loughhead, 1964](#)). Meridionale Strömungen transportieren im weiteren Verlauf kleinskalige Magnetfelder (zerfallene aktive Gebiete) polwärts, sodass aus dem toroidalen wieder ein poloidales Magnetfeld wird und ein neuer Sonnenfleckenzyklus beginnt.

Derartige aktive Regionen haben in der Regel eine bipolare Struktur. Der westliche Fleck einer Gruppe wird in der Regel zuerst erzeugt und ist typischerweise auch größer und einfacher strukturiert. So ein Fleck wird auf Englisch als „preceding (p) spot“, also als vorangehender Fleck bezeichnet. Der östliche oder nachfolgende (f) Fleck (engl. following spot) erscheint später und besteht häufig aus kleineren Einzelflecken. Ein gerade entstandener Sonnenfleck verschwindet in der Regel schon nach wenigen Tagen, wenngleich kleinere Exemplare sich schon früher auflösen. Langlebige Sonnenflecken sind die Ausnahme, können aber im Einzelfall über mehrere Sonnenrotationen beobachtet werden. Da über langlebige, voll ausgebildete Sonnenflecken häufiger berichtet wird, entsteht fälschlich der Eindruck, sie seien am häufigsten zu beobachten ([Weigert, Wendker und Wisotzki, 2012](#); [Solanki, 2003](#)).



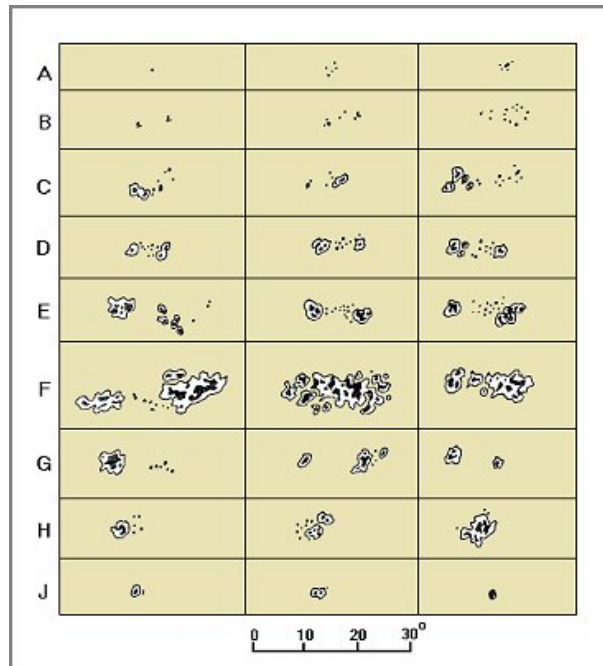
**Abbildung 3.3:** Aufwicklung der Magnetfeldlinien durch differentielle Rotation und die daraus folgenden Sonnenfleckenentstehung in der Konvektionszone. Die oberen 30% des Sonneninneren sind weiß und der im Inneren umschlossene Kern orange dargestellt. (a) Durch die differentielle Rotation wird aus dem poloidalen Magnetfeld ein toroidales Magnetfeld in Ost-West Richtung (b). (c) Die Knoten des toroidales Feldes spulen sich an der Oberfläche auf und führen zu Sonnenflecken. (d+e) Der durch den Solardynamo getriebene Plasmastrom (gelb dargestellt) treibt den magnetischen Fluss auf der Oberfläche in Richtung der Pole und unter der Oberfläche umgekehrt in Richtung des Äquators. Dies hat eine Umkehrung des Polarität zur Folge, sodass ein neues Magnetfeld mit umgekehrter Polarität entsteht (f).

Quelle: [www.ucar.edu/communications/quarterly/spring06/images/dikpati.jpg](http://www.ucar.edu/communications/quarterly/spring06/images/dikpati.jpg) am 23. November 2014

### 3.3 Klassifizierung

#### 3.3.1 Systematik nach Waldmeier

Diese Einteilung von Sonnenflecken wurde vom Schweizer Astronomen Max Waldmeier entwickelt und wird in der Folge auch als Züricher Klassifikation bezeichnet. Hierbei werden die Flecken nach Größe und Typ unterschieden. Je nach Größe erfolgt eine Klassifizierung von kleinen Poren, die mit A bezeichnet werden, bis hin zu den größten Fleckengruppen, die ein F erhalten. Zusätzlich zur Größe wird auch die Polarität berücksichtigt, d.h. neben den bipolaren Fleckengruppen B–G gibt es mit den Bezeichnungen H und J noch unipolare Flecken mit abnehmender Größe. Somit gibt es insgesamt neun verschiedene Klassen, die mit den Buchstaben A–J bezeichnet werden (siehe Abbildung 3.4). Ein Vorteil dieser Klassifizierung ist, dass die zeitliche Entwicklung eines Sonnenflecks berücksichtigt wird (McIntosh, 1990).



**Abbildung 3.4:** Dargestellt ist die Klassifikation nach Waldmeier nach Größe und Typ. Als erstes werden bipolare Fleckengruppen mit zunehmender Größe mit A–F eingeteilt, G ist ebenfalls eine große bipolare Fleckengruppe ohne jedoch kleine Zwischenflecken. H und I sind unipolare Flecken mit abnehmender Größe.

Quelle: <http://protecsolar.com/de/informationen/tips-tricks-zur-sonnenbeobachtung/basiswissen-sonne/sonnenflecken-photospharische-fackeln-und-lichtbrucken> am 3. Dezember 2014

(Mit freundlicher Genehmigung der Baader Planetarium GmbH)

- A: Einzelner Fleck oder kleine Gruppe, ohne Penumbra und ohne bipolare Struktur.
- B: Bipolare Fleckengruppe, ohne Penumbra.
- C: Bipolare Fleckengruppe, Hauptfleck mit Penumbra.
- D: Bipolare Fleckengruppe, zwei Hauptflecken mit Penumbra.
- E: Große bipolare Gruppe, Hauptflecken mit Penumbra und zahlreichen kleine Flecken. Ausdehnung von mindestens  $10^\circ$  auf der Sonne.
- F: Sehr große bipolare Gruppe, Ausdehnung von mindestens  $15^\circ$ .
- G: Große bipolare Gruppe, jedoch ohne kleinere Flecken zwischen den Hauptflecken. Ausdehnung von mindestens  $10^\circ$ .
- H: Unipolarer Fleck mit Penumbra, der größer als  $2,5^\circ$  ist.
- J: Unipolarer Fleck, der jedoch kleiner als  $2,5^\circ$  ist.

### 3.3.2 Magnetische Einteilung nach Hale

Die Klassifizierung nach Hale teilt die Sonnenflecken nach ihrer magnetischen Konfiguration ein und wird auch Mt. Wilson (magnetische) Klassifikation genannt. Die ersten Grundlagen für dieses System wurden von Hale (1909) am Mt. Wilson Observatory gelegt. Als Nomenklatur dienen hierbei griechische Buchstaben von  $\alpha$  bis  $\gamma$ . Zusätzlich werden noch die Suffixe für den führenden (p) und folgenden (f) Fleck verwendet, wobei in der Regel der (p) Fleck dominiert. Da mit dieser Methode jedoch keine Vorhersage von Strahlungsausbrüchen möglich war, führte Künzel (1960) die  $\delta$ -Klasse ein. Diese Klasse ist zu 90% mit hochaktiven Regionen verbunden, die für die meisten und stärksten Strahlungsausbrüche verantwortlich sind (Zirin, 1992).

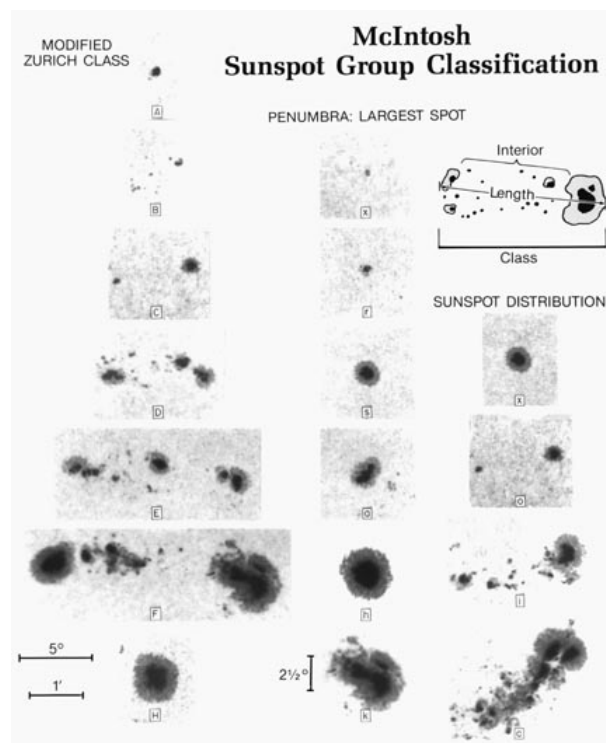
- $\alpha$ : Eine unipolare Sonnenfleckengruppe.
- $\beta$ : Eine Gruppe, die sowohl positive wie auch negative Polarität hat, die aber klar getrennt sind.
- $\gamma$ : Eine komplexe Region, in der positive und negative Polaritäten irregulär verteilt sind. Eine einzelne Linie reicht nicht mehr aus, um die Polaritäten voneinander zu trennen.
- $\beta\gamma$ : Eine bipolare Gruppe, aber zu komplex um einzelne Polaritäten trennen zu können.
- $\delta$ : In dieser Gruppe gibt es zwei (oder mehrere) Umbren mit unterschiedlicher magnetischer Polarität, die von einer gemeinsamen Penumbra umgeben sind.
- $\beta\delta$ : Eine Sonnenfleckengruppe mit  $\beta$ -Konfiguration, die aber auch  $\delta$ -Sonnenflecken enthält.
- $\beta\gamma\delta$ : Zusätzlich zu den  $\beta\gamma$ -Komponenten sind auch  $\delta$ -Flecken enthalten.
- $\gamma\delta$ : Wie die  $\gamma$ -Klasse, nur mit zusätzlichen  $\delta$ -Elementen.

### 3.3.3 McIntosh System

Diese Einteilung von McIntosh (1990) stellt eine Erweiterung des Züricher Schemas dar. Sie setzt sich aus drei Komponenten in der Form Zpc zusammen. Wobei (Z) für das Züricher (Waldmeier) Schema steht. Das Kürzel (p) beschreibt die Existenz einer Penumbra und gegebenenfalls ihre Ausdehnung. Abschließend steht das Kürzel (c) für die Verteilung innerhalb der Gruppe, insbesondere die Fleckendichte zwischen p- und f-Fleck. Dieses Modell, wie auch alle anderen Modelle, liefert keine fundamentalen Aussagen über die Entstehung oder das Wachstum von Sonnenflecken. Jedoch ist dieses Schema sehr sinnvoll in der Vorhersage von Strahlungsausbrüchen, denn ausgedehnte (Zürich E und F) Gruppen, mit symmetrischer Penumbra (k) und dicht gepackten Flecken produzieren besonders häufig Strahlungsausbrüche. Dementsprechend sind aktive Regionen mit komplexen Magnetfeld für die Vorhersage der Sonnenstürme von großer Bedeutung (Gurman, 1992).

p-Komponente:

- x: Keine Penumbra
- r: Eine unvollständige Penumbra umgibt den größten Fleck.
- s: Klein und symmetrisch
- a: Klein und asymmetrisch
- h: Größer als  $2,5^\circ$  und symmetrisch
- k: Größer als  $2,5^\circ$  und asymmetrisch



**Abbildung 3.5:** Modifizierte Zürich Klassifikation nach McIntosh, welches drei Kriterien hat. Auf der linken Seite wird nach der Züricher Klassifikation sortiert, die mittlere Spalte unterscheidet nach der Penumbra des größten Flecks und die rechte Seite zeigt die Verteilung innerhalb der Gruppe.

Quelle: [www.petermeadows.com/html/glossary.html](http://www.petermeadows.com/html/glossary.html) am 3. Dezember 2014

c-Komponente:

- x: Für unipolare Gruppen undefiniert.
- r: Offen
- i: Fortgeschritten
- c: Kompakt

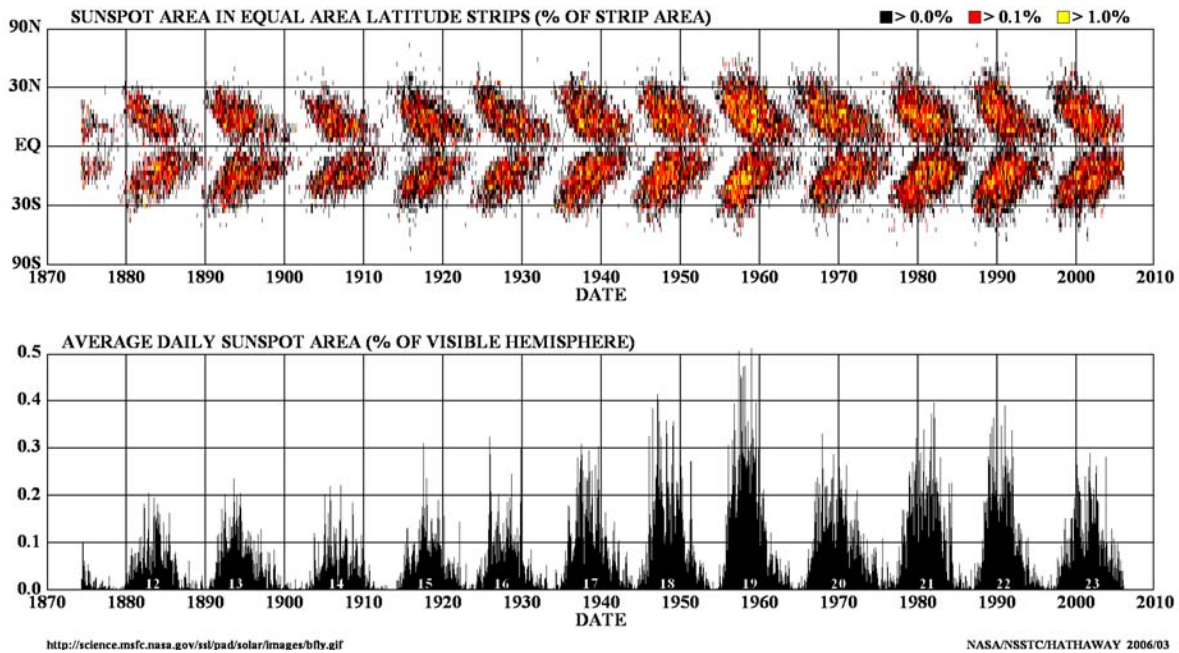
### 3.4 Sonnenfleckenzyklus

Die Anzahl der Sonnenflecken ist weder eine konstante Zahl noch rein zufällig, stattdessen unterliegt sie einem periodischen Verlauf. Die Periodendauer, d.h. die Zeit zwischen zwei maximalen Anzahlwerten, beträgt ungefähr 11 Jahre. Dieser Zyklus wurde von Schwabe (1843) festgestellt und wird daher als Schwabe-Zyklus bezeichnet.

Jedoch unterliegt der Zyklus außer der Veränderung der Anzahl der Flecken einer weiteren Variablen, der magnetischen Polarität. Im 22-jährigen Magnetfeldzyklus wandeln sich die Polaritäten der Polkappen. Dort sind dann kleinskalige Magnetfelder einer Polarität überhäufig. Bei bipolaren Gruppen in einer Hemisphäre haben p- und f-Flecken überwiegend N-S Polarität in den ersten 11 Jahren, danach S-N Polarität. Dies wurde von George Ellery Hale beobachtet und demzufolge als Hale-Zyklus bezeichnet. Hale (1912) hatte festgestellt, dass Sonnenflecken in der Regel in Fleckengruppen erscheinen, die eine Ost-West Orientierung aufweisen. Während eines Zyklus hat der östliche und westliche Teil verschiedene Polaritäten, die sich dann im nächsten Zyklus umkehren. Diese periodische Abfolge wird Hale-Nicholson-Gesetz genannt.

Innerhalb dieses Zeitraumes variiert zusätzlich noch die heliografische Breite der Gruppen. Am Anfang eines Zyklus entstehen Flecken bei etwa 30°–40° heliografischer Breite, weswegen dieser Bereich auch als Aktivitätszone (engl. activity belt) bezeichnet wird, da Sonnenflecken nicht in höheren Breitengraden

## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



**Abbildung 3.6:** Das Schmetterlingsdiagramm zeigt den 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne, der seit dem Jahr 1875 bekannt ist. Die obere Grafik zeigt den Breitengrad, auf welchem die Sonnenflecken erscheinen. Hierbei zeigt sich, dass die Sonnenflecken im Laufe des Zyklus immer weiter in Richtung Äquator wandern. Die untere Grafik zeigt die Bedeckung der sichtbaren Hemisphäre im Laufe der Zeit in Prozent und die jeweilige Zyklennummer.

Quelle: [www.nasa.gov/images/content/144051main\\_ButterflyDiagramLG.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/144051main_ButterflyDiagramLG.jpg) am 17. November 2014

auftauchen. Hierbei spricht man auch vom Spörer-Gesetz. Die mittlere Breite neuer Flecken nähert sich jedoch im Laufe des Zyklus immer weiter dem Äquator an, bis sie schließlich am höchsten Punkt der Aktivität einen Wert von etwa  $15^\circ$  erreicht.

Zur Beschreibung der Häufigkeiten von Sonnenflecken wird häufig die Züricher Sonnenfleckenrelativzahl  $R_z$  oder auch Wolf-Nummer verwendet, die nach dem Erfinder Rudolf Wolf benannt ist.

$$R_z = k(10g + f) \quad (3.1)$$

Hierbei steht das  $g$  für die Anzahl der Fleckengruppen und  $f$  für die Anzahl einzelner Flecken. Da die Anzahl der sichtbaren Flecken auch stark von der Beobachtung abhängt, wird zusätzlich noch die Normierungskonstante  $k$  eingeführt. Diese ermöglicht es, auch Daten anderer oder früherer Zählungen zu berücksichtigen, wie z.B. die Originalbeobachtung von Wolf ( $k = 1$ ). Auf diese Weise kann auch der Zeitpunkt der höchsten Fleckenzahl bestimmt werden. Durch die höhere Gewichtung von Fleckengruppen im Vergleich zu den Einzelflecken, ergibt sich eine enge Korrelation zwischen Sonnenfleckenrelativzahl und der flächenmäßigen Bedeckung.

Der Zyklus mit der Züricher Fleckenzahl wird im Schmetterlingsdiagramm (Abbildung 3.6) anschaulich verdeutlicht. Hierbei ist die Aktivität der Sonne seit Beginn der systematischen Aufzeichnung des Royal Greenwich Observatory im Jahr 1874 verzeichnet. Man erkennt deutlich eine periodische Abfolge der Maxima im Zeitabstand von 11 Jahren, wobei sich die einzelnen Zyklen überlappen. Ebenso ist die Häufung bei einer anfänglichen heliografischen Breite von ca.  $30^\circ$  deutlich zu erkennen, die dann in Laufe der Zeit abnimmt. Die Sonnenaktivität wird in Zyklen von dem Jahr 1749 an gezählt, genannt die Züricher Zeitreihe. Dies geht auf Rudolf Wolf zurück, der als Startpunkt für den 0. Zyklus das Jahr 1749 wählte. Vorangegangene Zyklen erhielten negative Zahlen. Dieses charakteristische Verhalten wurde erstmals von Edward Maunder im Jahr 1904 festgestellt. Die Höhe der Maxima ist jedoch nicht konstant, beispielsweise ist das Maximum der Hemisphärenbedeckung des 19. Zyklus wesentlich größer als das der umliegenden Zyklen.

Der Einfluss eines schwankenden Aktivitätszyklus lässt sich am Beispiel des sogenannten Maunder Mi-

nimum im 17. Jahrhundert verdeutlichen, welches 1890 von Spörer und Maunder entdeckt wurde. Auch wenn zu dieser Zeit die Beobachtung nicht in heutiger Quantität und Qualität vorgenommen wurde, ist der Mangel an Sonnenflecken nachweislich dokumentiert. Diese Zeit der Sonneninaktivität geht einher mit der „kleinen Eiszeit“, in der sogar größere Flüsse in Europa (nicht ganz so eindeutig für andere Kontinente) zugefroren waren (Sobotka, Bonet und Vazquez, 1993).

### 3.5 Wilson-Effekt

Dieser Effekt beruht auf Beobachtungen des schottischen Astrophysikers Wilson (1769). Er hat festgestellt, dass Sonnenflecken am Rand der Sonnenscheibe eingedellt wirken, wenn sie sich durch die Sonnenrotation am Beobachter vorbei bewegen. Dabei wirkt die Penumbra in Richtung des Sonnenrandes breiter als die Penumbra in Richtung der Mitte der Sonnenscheibe. Tatsächlich scheinen Sonnenflecken Vertiefungen in der Photosphäre zu sein. Jedoch beruht dieser Eindruck vor allem auf einem Projektion- bzw. Opazitätseffekt. Dies führt zu einer geometrischen Vertiefung, sodass an diesen Stellen in Schichten konstanter optischer Tiefe geblickt werden kann.

Die Opazität im sichtbaren Wellenlängenbereich beruht in der Regel auf negativen Wasserstoffionen  $H^-$ . In der kühleren Umbra ist im Vergleich zur Photosphäre wesentlich weniger negativ ionisierter Wasserstoff enthalten, da hier weniger freie Elektronen zur Verfügung stehen, um mit dem Wasserstoffatomen zu rekombinieren. Dies führt dazu, dass die Umbra transparenter ist als die umgebende Sonnenoberfläche. Der Wilson-Effekt beschreibt, wie tief in die Umbra geblickt werden kann. Balthasar und Woehl (1983) ermittelten eine optische Tiefe, die einer Sichttiefe von 500–1000 km entspricht (Loughhead und Bray, 1958; Gurman, 1992).

### 3.6 Strömungen in Sonnenflecken und ihrer Umgebung

Bei etwa 400 nm beträgt das Verhältnis zwischen den Intensitäten Umbra zu Photosphäre lediglich 67%. Damit fehlt ein Drittel des photosphärischen Flusses. Ein Grund für den fehlenden Strahlungsfluss könnten die ringförmigen Geschwindigkeitsfelder (engl. moat flows) sein, die einige Sonnenflecken umgeben. Das ist jedoch nur bei großen unipolaren Sonnenflecken der Fall. Neben den Strömungen in der umliegenden Umgebung treten in Sonnenflecken mit Evershed-Effekt auch Bewegungen im Sonnenfleck auf.

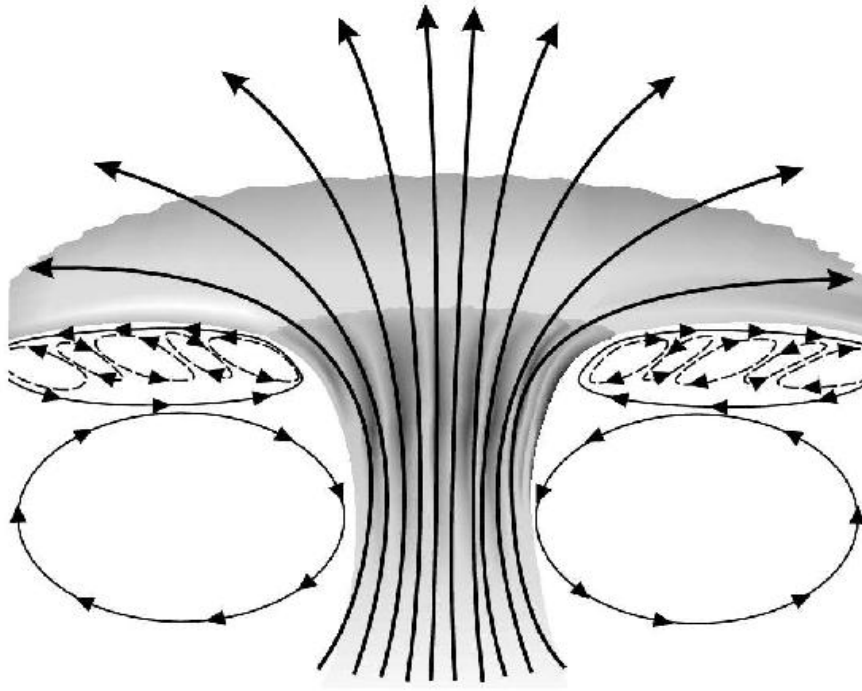
#### 3.6.1 Evershed-Effekt

Plasmaströmungen in photosphärischen Schichten der Penumbra wurden erstmals von Evershed (1909) am Kodaikanal Observatory beobachtet und tragen seitdem seinen Namen. Dabei handelt es sich um eine nach außen gerichtete Strömung, die Geschwindigkeiten von  $1\text{--}3\text{ km s}^{-1}$  erreicht. In der Chromosphäre und Übergangsregion tritt jedoch auch eine nach innen gerichtete Strömung auf, der inverse Evershed-Effekt (Sobotka und Roudier, 2007).

Die Strömungen folgen dabei den penumbralen Filamenten, in denen das Magnetfeld fast horizontal verläuft. Die magnetischen Flussröhren haben im inneren Rand der Penumbra einen Winkel von  $70^\circ$  zur Oberflächennormalen. Am äußeren Rand der Penumbra taucht die Strömung unter einem Winkel von  $100^\circ$  ab. Zur Erklärung dieses Effektes stehen mehrere Modelle zur Verfügung. Nach dem Siphon-Flow-Modell (Montesinos und Thomas, 1997) sind Druckgradienten unterschiedlicher Stärke zwischen den magnetischen Fußpunkten Ursache für die Strömungen. Das Moving-Tube-Modell (Schlichenmaier, Jahn und Schmidt, 1998a,b) verfolgt den Ansatz, dass der konvektive Aufstieg einer magnetischen Röhre einen lokalen Druckgradienten erzeugt, der die Strömung in der Magnetfeldröhre antreibt.

#### 3.6.2 Moat-Flow

Moats sind Regionen, in denen horizontale Strömungen beobachtet werden, die radial nach außen gerichtet sind. Anschaulich kann man dies mit einem Graben vergleichen, der eine Burg ringförmig umschließt. Diese Ströme werden als eine Manifestation der Konvektion gesehen und Moat-Flow genannt.



**Abbildung 3.7:** Schematische Darstellung von Strömungen nahe der Oberfläche und in Sonnenflecken. Deutlich zu erkennen sind hierbei die nach außen gerichtete Evershed-Strömung und die den Sonnenfleck umgebende Moat-Strömung (Abbildung 13 in [Zhao, Kosovichev und Sekii, 2010](#)).

Hierbei spielen vor allem kleinskalige magnetische Knoten (engl.: moving magnetic features, MMFs) und Granulen eine Rolle, die sich in der Regel vom Sonnenfleck weg bewegen. Besonders gut sind die kleinsten magnetischen Flusselemente im G-Band zu erkennen. Das Fraunhofer'sche G-Band ist ein schmales Gebiet im Sonnenspektrum bei 430,6 nm, das durch Absorptionsbande von CN und CH Molekülen geprägt ist.

[Sheeley \(1969\)](#) war der Erste, der diese magnetischen Elemente mit einem Durchmesser von etwa 1.000 km untersucht hat, wobei auch die figurative Beschreibung als Burggraben (engl. moat) auf ihn zurückgeht. Sie sind besonders gut im UV-Bereich als helle Punkte zu erkennen, wenngleich sie im sichtbaren Bereich unauffällig sind und sich wenig von der Umgebung unterscheiden. Nach seiner Ansicht bewegen sich diese vom Fleck weg, bis sie nach einer Entfernung von etwa 10.000 km verschwinden. Er konnte somit erstmalig von der Existenz einer ausgedehnten Region um Sonnenflecken berichten, in der das magnetische Feld nicht statisch ist. Gelegentlich bewegen sich Flussröhren aus der Penumbra in Richtung der umgebenden Granulation, welche teilweise auch mit der Evershed Strömung korreliert sind. [Sheeley \(1972\)](#) berichtet von Dopplergeschwindigkeiten von  $0,5\text{--}1,0\text{ km s}^{-1}$  und einer Ausdehnung von 10–20 Mm. Mithilfe von Zeitserien von Spektroheliogrammen wurden die Geschwindigkeiten später auf  $0,5\text{--}0,7\text{ km s}^{-1}$  eingegrenzt ([Brickhouse und Labonte, 1988](#)), welche damit doppelt so groß ist wie die Bewegungsgeschwindigkeit von Supergranulen. Der Radius des Moats ist zudem proportional zur Größe des Flecks und mit einer Form die eher asymmetrisch ist.

Die Strömung beginnt nach der Entstehung der Penumbra und kann bis nach dem Zerfall des Sonnenflecks bestehen bleiben ([Deng et al., 2007](#)). Eine mögliche Theorie zur Erklärung dieser Strömung hebt die Unterdrückung der Konvektion in den Sonnenflecken hervor ([Sobotka und Roudier, 2007](#)). Der so entstehende Temperatur- und Drucküberschuss verursacht demnach den Moat-Flow. So setzt in den tieferen Schichten ein Rückfluss ein, der die magnetische Struktur stabilisiert. Moats treten jedoch nur in Sonnenflecken auf, deren Penumbra klar ausgeprägt ist. Poren sollten somit keine Moats aufweisen. Dennoch ist der Moat-Flow selbst nach Verschwinden des dazu gehörigen Sonnenflecks noch nachweisbar ([Verma et al., 2012](#)). [Sobotka und Roudier \(2007\)](#) haben zudem festgestellt, dass ältere Flecken größere Moats aufweisen.



## Kapitel 4

# Datenverarbeitung und -analyse

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verhalten von unipolaren und achsensymmetrischen Sonnenflecken mit Penumbra zu untersuchen. Ihre schlichte Struktur ermöglicht eine einfache theoretische Beschreibung. Zudem stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die Geschwindigkeitsfelder der Sonnenflecken und ihrer Umgebung zu charakterisieren.

### 4.1 Methoden

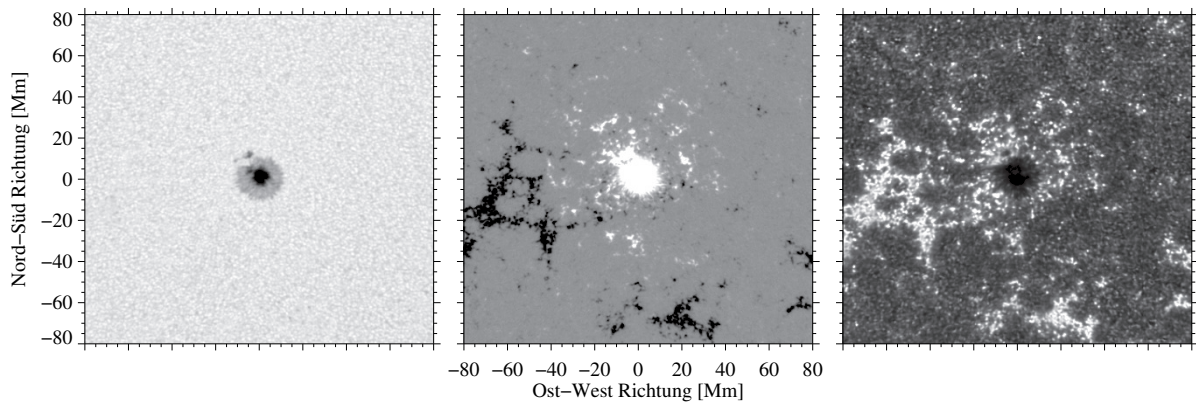
Bewegungen in der Sonnenatmosphäre können mit verschiedenen Methoden gemessen werden. Diese können wiederum in zwei Kategorien unterschieden werden, zum einen der Bestimmung der Sichtliniengeschwindigkeit von Strukturen der Sonnenoberfläche, welche mit Hilfe der Dopplerverschiebung von Spektrallinien berechnet werden kann und zum anderen anhand der Messung der Horizontalgeschwindigkeit. Hierzu stehen dem Beobachter das Local Correlation Tracking und das Feature Tracking zur Verfügung. Anhand dieser Geschwindigkeiten kann ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld erstellt werden. Zu beachten ist, dass nicht immer die Materiebewegung gemessen wird, da Helligkeitskontraste auch einer Phasengeschwindigkeit entsprechen können, z.B. eine periodische Helligkeitsschwankung.

#### 4.1.1 Local Correlation Tracking

Dieses Verfahren wurde von [November und Simon \(1988\)](#) für die beobachtende Sonnenphysik adaptiert, nach dem es von [Leese, Novak und Taylor \(1970\)](#) für die Verfolgung von Wolkenbewegungen durch geostationäre Satelliten entwickelt wurde. Für das Local Correlation Tracking (LCT) wird eine Abfolge von Bildern benötigt. Diese dienen dazu, die Bewegung von Strukturen zu detektieren und zu vermessen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Struktur bewegt, ergibt sich dann aus einem Verschiebungsvektor und der zeitlichen Differenz der aufgenommenen Bilder. Hierzu wird die Verschiebung der Regionen zwischen zwei Bildern  $I(x, t)$  und  $I(x, t + \Delta t)$  gemessen, wobei  $I(x, t)$  die Intensität als Funktion von Zeit  $t$  und Ort  $x$  darstellt. Die Kreuzkorrelation der Regionen kann mit folgender Funktion bestimmt werden ([Schuck, 2006](#)):

$$C \{ \chi, \tau, \Delta t; P \} = \int d^2x w(x - \chi) I(x, \tau + \Delta t) I[x - u(P; x)\Delta t, \tau]$$

In diesem Zusammenhang ist  $w$  die Fensterfunktion zur Lokalisierung der Korrelationsfunktion den beiden Bildern. Der Vektor  $P$  beschreibt das Geschwindigkeitsprofil  $u(P; x) = u_0 \equiv U_0 \hat{x} + V_0 \hat{y}$ , wobei die Geschwindigkeit als konstant angesehen wird. Der Kreuzkorrelationskoeffizient bestimmt den Einheitswinkel zwischen der zentrierten Region bei  $\chi$  und  $\tau + \Delta t$  und  $\chi - u(P; x)\Delta t$  und  $\tau$ . Diese wird durch Abschätzung des lokalen Maximums mit der lokalen Korrelationsfunktion ermittelt. In diesem Zusammenhang muss der Parameter  $P \nabla_p C = 0$  sein ([Schuck, 2006](#)). Für die HMI Kontinuumsbilder wird in dieser Arbeit ein von [Beauregard, Verma und Denker \(2012\)](#) modifizierter Algorithmus verwendet, der zur Verarbeitung von Hinode G-Band Bildern entwickelt wurde ([Verma und Denker, 2011](#)).



**Abbildung 4.1:** Kontinuumsbild, Magnetogramm und Vakuumultraviolett Bild (von links nach rechts) für den Sonnenfleck NOAA 11658, der am 18. Januar 2013 den Zentralmeridian der Sonne überquerte.

## 4.1.2 Differential Affine Velocity Estimator

Beim Differential Affine Velocity Estimator (DAVE, [Schuck, 2006](#)) handelt es sich um eine weitere optische Methode zur Schätzung der Strömungsgeschwindigkeiten aus einer Sequenz von Magnetogrammen. DAVE modelliert Bewegungen entweder mit der Kontinuitätsgleichung oder der Konvektionsgleichung. Typischerweise geben die Magnetogramme nur die Feldstärke entlang der Sichtlinie wieder. Allerdings kann die Version DAVE4VM auch für Vektormagnetogramme verwendet werden. Hier wird die Geschwindigkeit gemessen, mit der das Magnetfeld  $(B_x, B_y, B_z)$  transportiert wird, wobei die ideale magnetische Induktionsgleichung zu Grunde gelegt wird ([Wang, Liu und Wang, 2010](#)):

$$\partial_t B_z + \nabla_h \cdot (B_z V_h - V_z B_h) = 0,$$

in welcher die Plasmageschwindigkeit  $V$  und das Magnetfeld  $B$  in kartesischen Koordinaten zerlegt sind.

## 4.2 Analyse

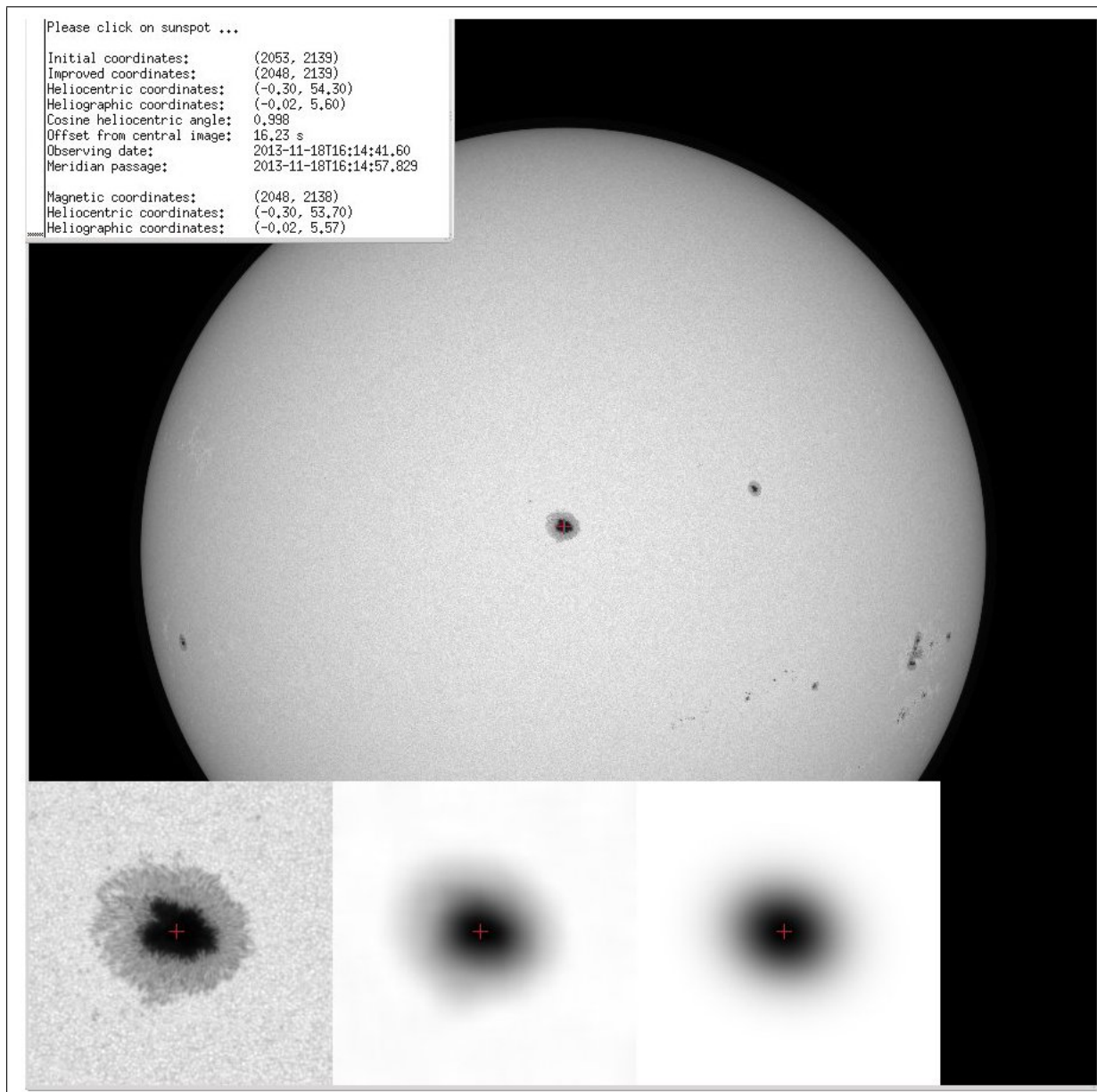
### 4.2.1 Vorbetrachtung

Zur näheren Betrachtung wurden Sonnenflecken ausgewählt, die den eingangs beschriebenen Kriterien entsprechen. Diese sollten isolierte, nahezu runde Flecken sein, die vollständig von einer Penumbra umschlossen sind. Dazu wurde, mit Hilfe der HMI Kontinuumsbilder, die Sonne im Zeitraum vom 18. Januar 2013 bis zum 11. August 2014 betrachtet. Ausgewählte Sonnenflecken konnten anschließend mit dem SolarMonitor weiter identifiziert werden. Die Sonnenflecken, die als geeignet erschienen, werden in Tabelle 4.1 mit der Flecknummer der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aufgelistet. Hierbei wurde der Zeitpunkt gewählt, an dem der Sonnenfleck den Zentralmeridian der Sonne überschreitet. Neben dem Breitengrad des Sonnenflecks wird auch die Flecknummer und der Fleckentyp aufgeführt. Die Einordnung des Fleckentyps erfolgt nach dem McIntosh-System und der magnetischen Einteilung nach Hale.

Als Beispiel für die weiteren Schritte der Analyse wurde ein Sonnenfleck gewählt, der am 18. Januar 2013 auf dem Sonnenmeridian lag. Für diesen Fleck wurden Daten für einen Zeitraum von 12 Stunden herunter geladen (siehe [Abbildung 4.1](#)). Dabei handelt es sich um die HMI-Kontinuumsbilder für 617.3 nm und HMI-Magnetogramme mit einem Aufnahmeintervall von 45 s, sowie AIA Daten bei einer Wellenlänge von 160 nm mit einer Abtastrate von 24 s. Kontinuumsbilder enthalten die Strahlungintensität bei einer bestimmten Wellenlänge, während die Magnetogramme jedem Pixel die magnetischen Flussdichte  $B$  zuordnen. Im Magnetogrammen ist deutlich das aktive Gebiet erkennbar, welches den Sonnenfleck umgibt und zwischen führendem und folgendem Fleck auftritt. Die HMI-Kontinuumsbilder erscheinen vergleichsweise ruhig und zeigen die Granulation. Diese scheinbare ruhige Fläche enthält

Datum	Uhrzeit	NOAA Flecknummer	Breitengrad	Fleckentyp	
18.01.2013	15:06 UT	11658	S13	$\alpha\gamma$	Hax
30.01.2013	05:53 UT	11663	S11	$\alpha$	Dso
16.02.2013	12:54 UT	11671	N14	$\alpha\gamma$	Hsx
22.02.2013	02:23 UT	11676	S19	$\alpha\gamma\delta$	Hsx
26.06.2013	06:10 UT	11777	S16	$\alpha\gamma$	Hsx
29.07.2013	10:56 UT	11801	N19	$\alpha\gamma\delta$	Hax
06.08.2013	01:56 UT	11809	N12	$\beta$	Cso
23.09.2013	19:39 UT	11846	S18	$\alpha$	Hax
08.10.2013	03:51 UT	11857	S13	$\alpha$	Hsx
18.11.2013	15:45 UT	11899	N06	$\alpha\gamma$	Cko
23.11.2013	17:10 UT	11903	S12	$\alpha$	Hsx
08.12.2013	15:26 UT	11912	S21	$\alpha$	Hsx
24.12.2013	02:27 UT	11931	S14	$\alpha$	Hax
05.01.2014	13:12 UT	11942	N10	$\alpha$	Hsx
11.01.2014	23:13 UT	11948	N06	$\alpha$	Hsx
21.01.2014	16:51 UT	11955	S14	$\alpha$	Hax
03.02.2014	21:01 UT	11967	S13	$\beta\gamma\delta$	Fkc
27.03.2014	06:38 UT	12018	N03	$\beta$	Cao
13.04.2014	18:06 UT	12032	N13	$\beta\gamma$	Cso
14.04.2014	15:42 UT	12033	N12	$\alpha$	Hsx
21.04.2014	22:54 UT	12042	N19	$\beta$	Eko
25.04.2014	18:36 UT	12045	S25	$\beta$	Cso
03.05.2014	12:42 UT	12050	N12	$\alpha$	Hax
17.05.2014	07:00 UT	12061	S25	$\alpha$	Hsx
06.06.2014	23:45 UT	12081	N05	$\alpha$	Axx
17.06.2014	03:00 UT	12090	N24	$\alpha$	Hsx
11.08.2014	08:41 UT	13135	N12	$\beta$	Dso

**Tabelle 4.1:** In der Tabelle sind alle Sonnenflecken und Sonnenfleckengruppen aufgelistet, die im Rahmen der Arbeit analysiert wurden. Die Uhrzeit und der Breitengrad bestimmen den Zeitpunkt und Ort der Meridiandurchgangs. Mit der NOAA Flecknummer wird jeder beobachtete Sonnenfleck eindeutig katalogisiert. Der Fleckentyp ist eine Klassifizierung, am Tag der Meridianpassage, nach der magnetischen Einteilung von Hale sowie nach dem McIntosh System.

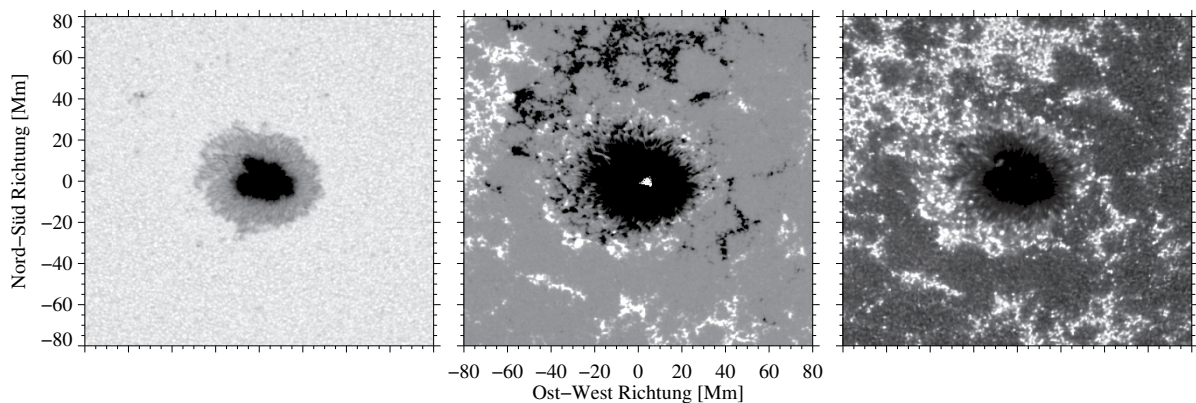


**Abbildung 4.2:** Zeitpunkt und Ort des Meridiandurchgangs werden mit einem interaktiven IDL Programm bestimmt.

jedoch auch Fackeln, die im optischen Licht nur am Sonnenrand sichtbar werden. Diese können jedoch besser im aktiven Gebiet in den AIA-Aufnahmen beobachtet werden. Die Ausgabe der Daten erfolgt im Flexible Image Transport System (FITS, [Hanisch et al., 2001](#)), dem in der Astrophysik üblichen Dateiformat.

#### 4.2.2 Datenverarbeitung

Für die weitere Analyse mussten die HMI und AIA Daten synchronisiert werden, da diese mit verschiedenen Bildraten erstellt und somit zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Hierzu werden die AIA Bilder so korrigiert (differentielle Rotation und Bildskala), dass sie den HMI Daten für einen gegebenen Zeitpunkt entsprechen. Indem den jeweiligen Pixeln Sonnenkoordinaten zugeordnet werden, war es möglich, den Zeitpunkt zu ermitteln, bei dem der Sonnenfleck genau über dem Sonnenmeridian liegt. Der Sonnenfleck wurde so zentriert, dass die dunkelste Stelle der Umbra (nach leichter Glättung des Bildes) genau im Zentrum des Bildausschnitts liegt, der später für die Bestimmung der horizontalen Strömungen verwendet wird. Hierzu wurde mit Hilfe eines in der Interactive Data Language (IDL) geschriebenen Programms die genaue Überquerung des Meridians ermittelt. Ein Teilausschnitt des Bildschirms für diesen Verarbeitungsschritt ist in [Abbildung 4.2](#) dargestellt.



**Abbildung 4.3:** Kontinuumsbild, Magnetogramm und VUV Bild (von links nach rechts) für den Sonnenfleck NOAA 11899, der am 18. November 2013 den Zentralmeridian der Sonne überquerte.

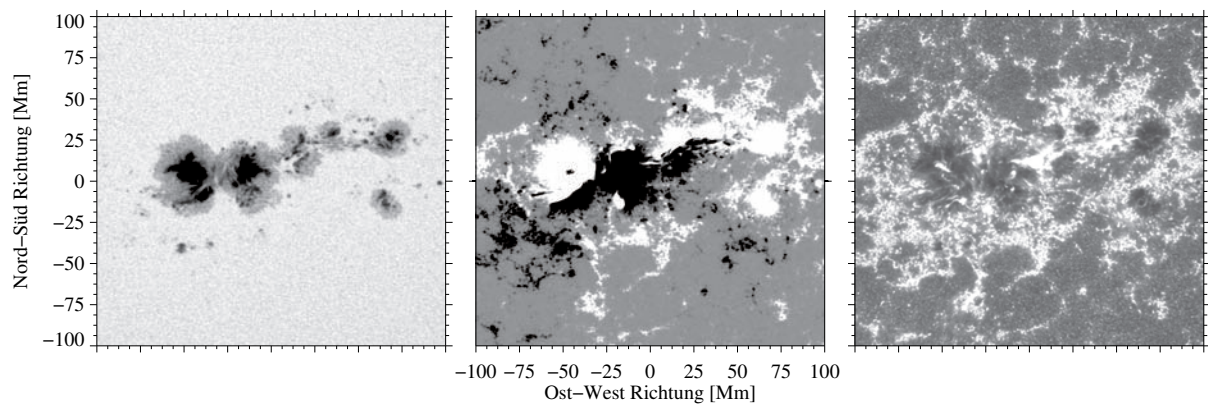
Für jedes Bild der zwölfstündigen Zeitserie wird nun die differentielle Rotation der Sonne ausgeglichen. Hierzu wird der Meridiandurchgang als Referenz genutzt. Dieser Bildausschnitt (engl. region-of-interest, ROI) richtet sich nach der Ausdehnung des größten Sonnenflecks und wird in diesem Fall auf eine Größe von  $640 \times 640$  Pixeln ( $160 \text{ Mm} \times 160 \text{ Mm}$ ) festgelegt. Für die jeweiligen Bilder der beiden Instrumente waren angemessene Umgebungen zu berücksichtigen, um die vorhandenen Strukturen (Moat und umgebende Supergranulen) sichtbar zu machen. Nun werden Längengrad, Breitengrad und der Kosinus des heliozentrischen Winkels eingeführt. Aufgrund der Kugelform der Sonne ist außerdem noch eine geometrische Korrektur, auf Grundlage der heliozentrischen Koordinaten, notwendig. Intensitätsschwankungen, verursacht durch die Sonnenoszillation, werden mit Hilfe eines Filters unterdrückt, der räumliche und zeitliche Frequenzen oberhalb der photosphärischen Schallgeschwindigkeit ausblendet. Das gewählte Abtastfenster und der Hochpassfilter haben eine Ausdehnung von  $6,4 \text{ Mm} \times 6,4 \text{ Mm}$  und werden als zweidimensionale Gaussfunktion mit einer Halbwertsbreite (engl. full-width-at-half-maximum, FWHM) von  $2 \text{ Mm}$  implementiert.

Der Vorgang der Bildkorrektur wird abschließend auf alle Bilder des Beobachtungsintervalls angewendet. Für eine besonders detaillierte Untersuchung wurde der interessante, da besonders große Sonnenfleck NOAA 11899 gewählt, der am 18. November 2013 den Sonnenmeridian überquerte (Abbildung 4.3). Dieser wurde am 14. November 2013 zum ersten Mal auf der sichtbaren Sonnenscheibe beobachtet und wurde zunächst als Hkx-Fleck im McIntosh System bestimmt, d.h. er ist ein unipolarer Fleck mit Penumbra, der größer als  $2,5^\circ$  ist und eine asymmetrische Penumbra von über  $2,5^\circ$  hat.

In Abgrenzung zu den symmetrischen Fleckentypen wird eine komplexe bipolare Fleckengruppe (NOAA 11967) betrachtet, die in Abbildung 4.4 dargestellt ist. Diese Fleckengruppe wird im McIntosh System als Fkc charakterisiert. Sie ist somit eine sehr große kompakte bipolare Gruppe mit einer Ausdehnung von mehr als  $15^\circ$ , die eine große asymmetrische Penumbra aufweist.

Im Vergleich zu einem unipolaren Fleck muss in diesem Fall die ROI vergrößert werden, um der Ausdehnung der Fleckengruppe gerecht zu werden. So wird das beobachtete Bildfeld auf  $960 \times 960$  Pixel ausgedehnt. Aufgrund der komplizierteren Struktur ist eine andere Art der Zentrierung innerhalb der ROI notwendig, da die Gruppe im östlichen Teil zwei größere Flecken enthält. Als Zentrum wurde der Mittelpunkt der Ost-Westachse der Fleckengruppe genommen, sodass die vergrößerte ROI nun das gesamte aktive Gebiet enthält. Dies führt jedoch dazu, dass das Zentrum der beiden östlichen Flecken nicht im Mittelpunkt steht.

Nach der jeweiligen Vorbetrachtung, Meridianpassage und Zentrierung der ROI, wird anschließend mit Hilfe von LCT (Abschnitt 4.1.1) und DAVE (Abschnitt 4.1.2) die aktive Region näher analysiert. LCT ermöglicht es, horizontale Bewegungen aus den Kontinuums- und VUV Bildern zu berechnen. Ein  $11$ -Pixel ( $4,4 \text{ Mm}$ ) großes Abtastfenster wird benutzt, um mit DAVE horizontale Bewegungen magnetischer Elemente aus den HMI Magnetogrammen zu bestimmen. Dabei gilt die Annahme, dass die magnetischen Feldlinien senkrecht zu der Oberfläche der Sonne verlaufen. Wenn dies erfüllt ist, kann die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  durch die magnetische Permeabilität des betrachteten Raumpunktes  $\mu$  geteilt werden. Somit erhalten wir die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$ , da  $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ . Zur Darstellung der magnetischen Flussstrans-



**Abbildung 4.4:** Kontinuumsbild, Magnetogramm und VUV Bild (von links nach rechts) für die Fleckengruppe NOAA 11967, die am 3. Februar 2014 den Zentralmeridian der Sonne überquerte.

portgeschwindigkeit wurden Vektorfelder auf die jeweiligen Bilder bzw. Magnetogramme der einzelnen Sonnenflecken projiziert. Das aktive Gebiet NOAA 11899 muss hierbei gesondert behandelt werden, da das beobachtete Magnetfeld an einzelnen Punkten in der Umbra gesättigt ist bzw. die Aufspaltung der Spektrallinie durch den Zeeman-Effekt so groß ist, dass sie vom HMI Instrument nicht mehr richtig erfasst wird. Daraus ergibt sich fälschlicherweise eine Umkehrung der Polarität des Magnetfeldes. Dieses Artefakt muss folgerichtig entfernt werden.

Nun stehen alle Hilfsmittel bereit, um mit der Untersuchung der horizontalen Geschwindigkeitsfelder in und um Sonnenflecken herum zu beginnen. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Überprüfung der generellen Eigenschaften der Moat-Strömung und der bisherigen Kenntnisse.

## Kapitel 5

# Auswertung

Hinsichtlich der überdurchschnittlichen Ausdehnung des Sonnenflecks NOAA 11899 vom 18. November 2013 wird dieser Fleck besonders betrachtet. Insbesondere wird die Frage gestellt, ob ein gravierender Unterschied zu eher durchschnittlichen Sonnenflecken besteht. An dieser Stelle soll deshalb geklärt werden, ob es horizontale Strömungen gibt, die sich von kleinen oder mittleren Sonnenflecken unterscheiden. Große Flecken treten in der Regel in niedrigen Breiten auf, vor allem in der abnehmenden Phase des Sonnenzyklus (Sobotka und Roudier, 2007). Dieses Phänomen haben auch Koutchmy und Le Piouffle (2009) bei ihrer Untersuchung des 23. Sonnenzyklus festgestellt. Dabei ist eine klare Trennung zwischen den Zyklen nicht immer eindeutig, da Zyklen sich überschneiden (siehe das Schmetterlingsdiagramm in Abbildung 3.6). Jedoch können die Zyklen anhand von Polarität und Breitengrad differenziert werden.

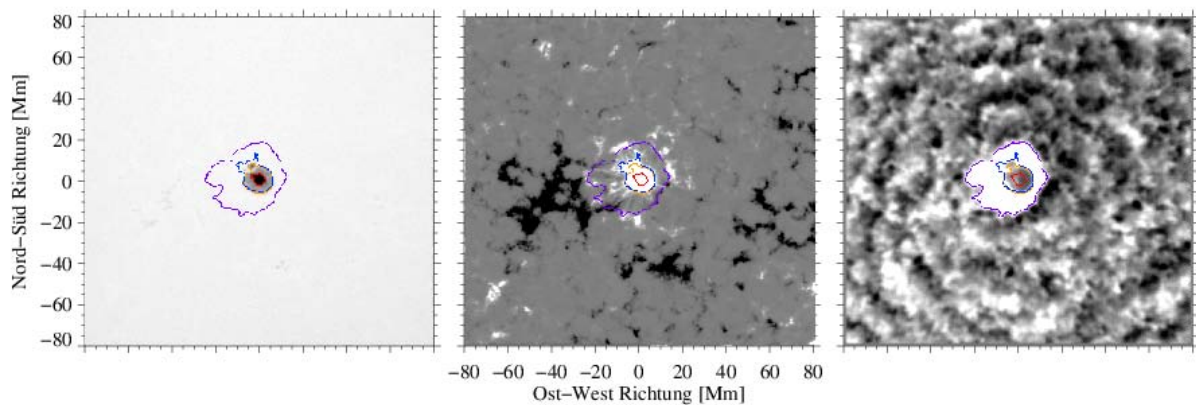
### 5.1 Bestimmung der Fleckenausdehnung

Zur Beschreibung der Ausdehnung eines Sonnenflecks können mehrere Größen herangezogen werden (siehe Abbildung 5.1). Dabei wurden morphologische Bildverarbeitungsmethoden verwendet, um die Konturen zu vereinfachen. Photometrisch kann sowohl die Größe der Umbra als auch die Fläche des gesamten Flecks bestimmt werden. Zu diesem Zweck bietet sich das Kontinuumsbild an, da sich dort der Fleck deutlich von der ruhigen Sonne abhebt. Der Grenzbereich der Umbra wird durch eine rote Linie beschrieben, an dieser Stelle beträgt die Kontinuumsintensität weniger als 60% der Intensität der ruhigen Sonne  $I_{\text{con}}$ . Bei einem Schwellenwert von  $0,92 \times I_{\text{con}}$  wird die Grenze des Sonnenflecks erreicht und durch eine orangefarbene Linie markiert. Zur physikalischen Betrachtung kann außerdem noch der Moat des Flecks und die magnetische Ausdehnung des Flecks beschrieben werden. Die Fläche des zugehörigen Magnetfeldes kann im Magnetogramm nachvollzogen werden, die den Sonnenfleck je nach Polarität als schwarze oder weiße Fläche umschließt. Als Grenze wird die Stelle definiert an der die magnetische Flussdichte  $B_{\text{max}}$  auf einen Wert unter 100 G gefallen ist und wird in der Abbildung als blaue Linie dargestellt. Außerdem soll in Anbetracht des Kernthemas auch die Fläche des Moats bestimmt werden. Auf der rechten Seite der Abbildung zeigt sich deutlich, dass der Moat den Sonnenfleck weiträumig umschließt (violette Linie). Außerdem wird auch eine Ost-West Asymmetrie deutlich, die ausführlich in Kapitel 5.4 diskutiert wird.

### 5.2 Horizontale Geschwindigkeitsfelder

#### 5.2.1 Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Datensätze

In den mit LCT und DAVE erzeugten Strömungskarten sind die Richtung und der Betrag der Geschwindigkeit durch farbige Vektoren gekennzeichnet. Neben der Länge markiert auch die Farbe der Vektoren den Betrag der Geschwindigkeit, sodass sich zusammenhängende Regionen großer oder kleiner Geschwindigkeiten leicht erkennen lassen. Die Strömungskarten verdeutlichen eine vom Kern radial ausgehende Strömung die am Rand des Sonnenflecks einsetzt und sich radial ausbreitet. Die Strömungskarten sämtlicher untersuchter Sonnenflecken sind im Appendix B dargestellt. Der Grund für dieses charakteristische Strömungsfeld ist die Moat-Strömung, die sich von der Umbra des Sonnenflecks radial nach



**Abbildung 5.1:** Hier sind die jeweiligen Bereiche eines Sonnenflecks im Kontinuumsbild, Magnetogramm und Vakuumultraviolettbild dargestellt. Die rote Umrandung markiert die Umbra, orange die photometrische Fleckenausdehnung, blau die magnetische Ausdehnung und violett die Moatgröße.

außen ausbreitet. Zusätzlich sind noch Strömungen in den Penumbren von Sonnenflecken zu beobachten, die ihren Ursprung vermutlich in der Evershed-Strömung haben.

### Kontinuumsbilder

Dunklere, violette Vektoren stehen in den Kontinuumsbildern in [Abbildung 5.2](#) für Geschwindigkeiten niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$ , wohingegen rote Vektoren auf Geschwindigkeiten von mehr als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  hinweisen. Die Abbildungen zeigen sehr deutlich, dass die nach außen gerichtete Bewegung im Inneren der Penumbra einsetzt und sich bis zu 20 Mm außerhalb des Sonnenflecks erstreckt. Die radiale Ausdehnung ist jedoch nicht in alle Richtungen gleich und wird später diskutiert. Die größten Geschwindigkeiten werden am äußeren Rand der Penumbra mit Werten von  $0,4 \text{ km s}^{-1}$  erreicht. Zusätzlich gibt es jedoch scheinbar auch eine entgegengesetzte Bewegung vom Inneren der Penumbra in Richtung der Umbra. Diese Strömung ist jedoch deutlich schwächer und sie dehnt sich nur bis zum äußeren Rand der Umbra aus. Die Durchstoßpunkte von magnetischen Flussröhren an der Oberfläche der Sonne erscheinen etwas heller (engl. penumbral grains). Richten sich magnetische Flussröhren in der Penumbra langsam auf, wandern ihre Durchstoßpunkte zur Umbra. Dies ist ein erster Hinweis, dass mit LCT oder DAVE gemessene Strömungsfelder nicht immer mit Plasmabewegungen übereinstimmen müssen.

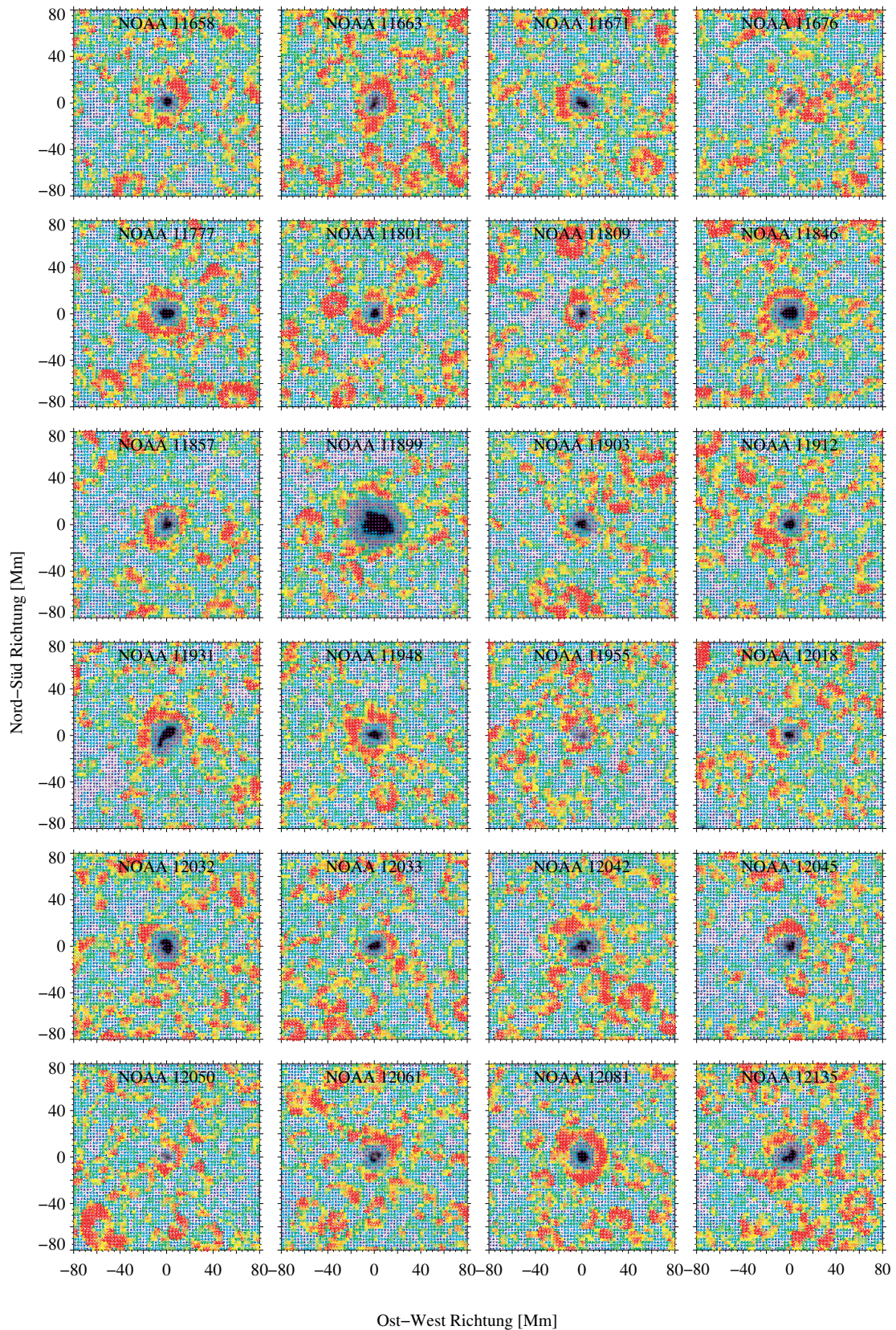
### Magnetogramme

Die Strömungskarten in [Abbildung 5.3](#) stellen die magnetische Flussdichte dar, wobei hier Geschwindigkeiten unter  $0,08 \text{ km s}^{-1}$  mit violetten und Geschwindigkeiten über  $0,5 \text{ km s}^{-1}$  mit roten Vektoren verdeutlicht werden. Schwarze und weiße Bereiche entsprechen Gebieten mit entgegengesetzter Polarität im Magnetogramm. Im Gegensatz zu der auf Kontinuumsbildern basierenden Strömungskarte bestehen keine Unterschiede zwischen Bewegungen in Penumbra und Umbra. Die Bewegung setzt schon am Rand der Umbra ein und ist radial nach außen gerichtet. Die dabei erkennbare Moat-Strömung weist eine überwiegend asymmetrische Struktur in Ost-West Richtung auf. Dieser Sachverhalt wird im [Kapitel 5.4](#) näher untersucht. Die Strömung breitet sich dabei bis zu 30 Mm aus.

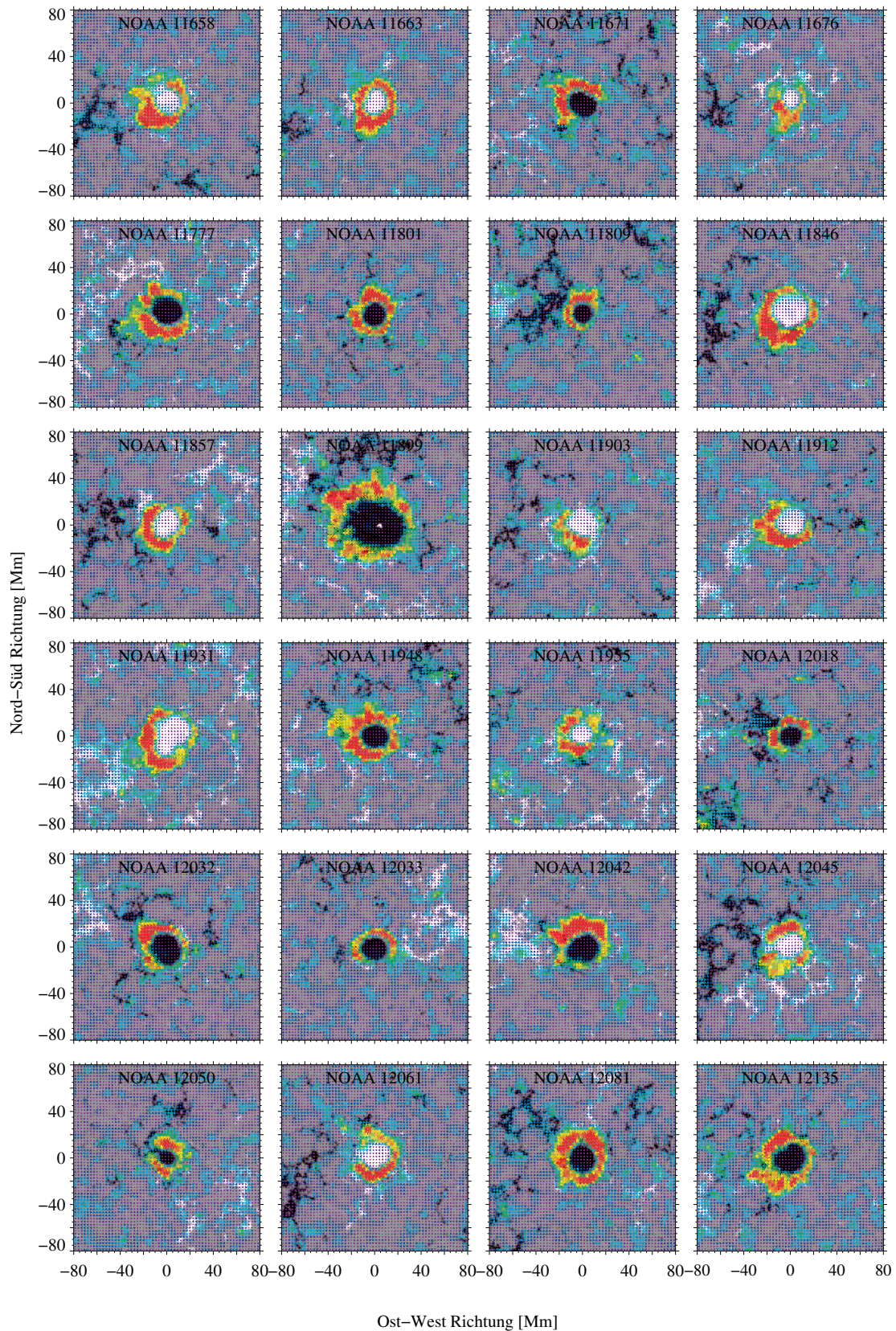
### Vakuumultraviolettbilder

[Abbildung 5.4](#) enthält die Vakuumultraviolettbilder (VUV Bilder) und die dazugehörigen Geschwindigkeitsvektoren, die im Bereich von  $0,1\text{--}0,5 \text{ km s}^{-1}$  liegen. In dieser Abbildung verhalten sich die Vektoren ähnlich wie in der Darstellung der Kontinuumsbilder. Die Strömungen, die von der Penumbra ausgehen, scheinen dabei jedoch oftmals stärker ausgeprägt zu sein. Abgesehen von der höheren Strömungsgeschwindigkeit ist auch die Ausbreitungsrichtung geordnet.

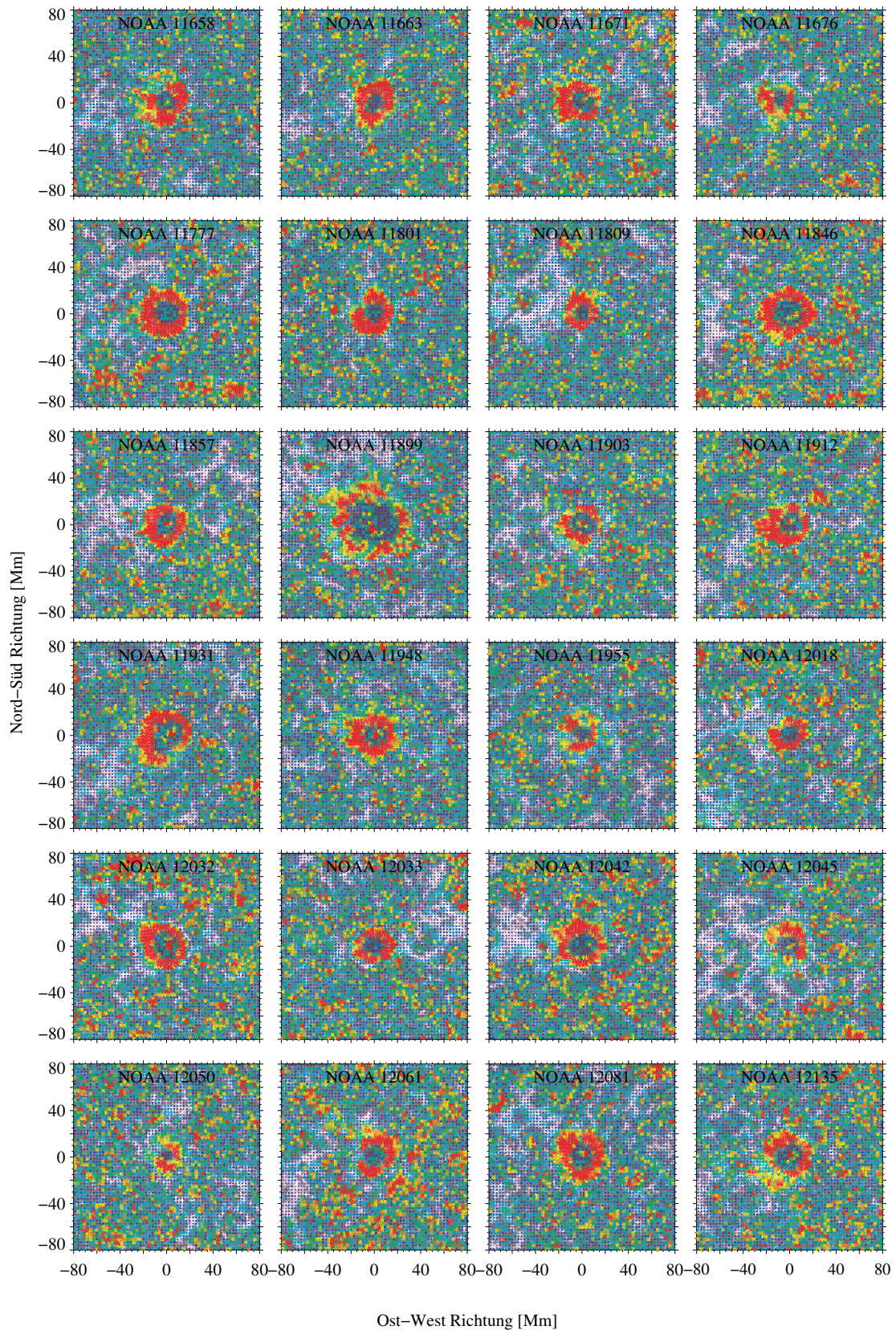




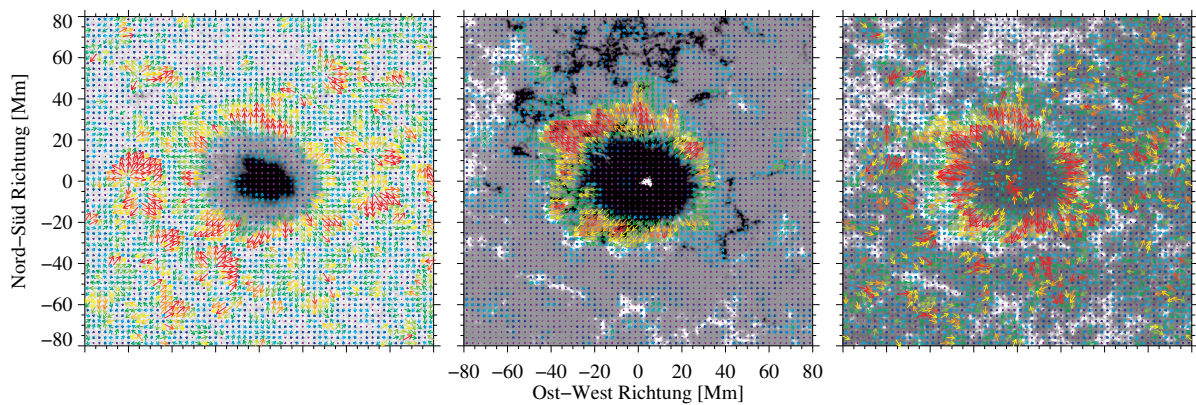
**Abbildung 5.2:** Exemplarische Zusammenstellung von Strömungskarten, die mit LCT erstellt wurden. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$  von 24 Sonnenflecken. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 5.3:** Exemplarische Zusammenstellung von Strömungskarten, die mit DAVE erstellt wurden. Sie basieren auf der magnetischen Flussdichte  $B$  von 24 Sonnenflecken. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 5.4:** Exemplarische Zusammenstellung von Strömungskarten, die mit LCT erstellt wurden. Sie basieren auf der VUV Intensität  $I_{VUV}$  bei 160 nm von 24 Sonnenflecken. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 5.5:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11899. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren entsprechen Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

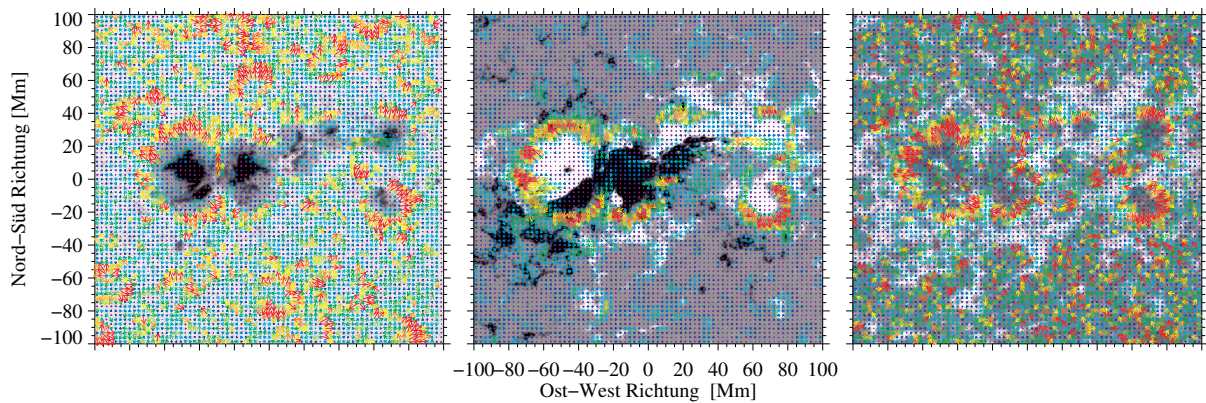
## 5.2.2 Großer Einzelfleck NOAA 11899

Mit einer Fläche von  $2264 \text{ Mm}^2$  ist der Fleck in der Region NOAA 11899 außergewöhnlich groß. Dieser Fleck wurde zunächst am 14. November 2013 als  $\alpha$ -Region identifiziert, genauer gesagt als Hkx-Fleck im McIntosh System (unipolarer Fleck mit einer Ausdehnung von über  $2,5^\circ$  und einer asymmetrischen Penumbra von über  $2,5^\circ$ ). Schon einen Tag später erfolgte mit der Einordnung in die Dki-Klasse (bipolare Fleckengruppe mit zwei Hauptflecken und einer asymmetrischen Penumbra) eine neue Klassifizierung als  $\beta$ -Region. Der somit entdeckte zweite Fleck in der Region nimmt jedoch im weiteren Verlauf keinen großen Einfluss auf den großen Fleck. Das hat zur Folge, dass die Klassifizierung, vom zwischenzeitlichen Cko (bipolare Fleckengruppe mit zwei Hauptflecken, aber nur der Hauptfleck hat eine Penumbra), letztendlich doch wieder zur  $\alpha$ -Region zurückkehrt. Insgesamt weist die Region somit eine einfach magnetische Konfiguration auf, deren großer Fleck für eine Reihe von C-Klassen Strahlungsausbrüchen verantwortlich ist.

Innerhalb des Flecks (siehe Abbildung 5.5) gibt es bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten keinen Unterschied zu anderen unipolaren Flecken. Die Reichweite der Strömungen erstreckt sich über einen ähnlichen Bereich wie bei kleineren Sonnenflecken, sodass das Gebiet der Moat-Strömung in Relation zur großen Ausdehnung des Flecks verhältnismäßig gering erscheint. Des Weiteren wird beobachtet, dass innerhalb der Umbra im Magnetogramm und im Kontinuumsbild überwiegend keine Bewegung bzw. nur wenig Bewegung auftritt. In den Vakuumultraviolett Bildern zeigen sich jedoch eine nach innen gerichtete Bewegungen innerhalb der Umbra.

## 5.2.3 Ausgedehnte Fleckengruppe NOAA 11967

Um ein möglichst allgemeingültiges Urteil über Sonnenflecken fällen zu können, ist es notwendig auch komplexere Strukturen zu betrachten. Auf ein umfassendes Bild wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da hier das Augenmerk auf unipolare Sonnenflecken gelegt wurde. Nichtsdestotrotz soll mit der Fleckengruppe NOAA 11967 zumindest eine komplexe Gruppe exemplarisch behandelt werden. Diese Gruppe wird nach dem McIntosh System als Fkc-Gruppe klassifiziert, d.h. als sehr große, kompakte bipolare Gruppe mit einer Ausdehnung von mindestens  $15^\circ$  und einer ausgeprägtem Penumbra. Hinsichtlich der Unterschiede der Fleckengruppe zu unipolaren Flecken ist der auffälligste Punkt im Magnetogramm zu finden. Im Gegensatz zu unipolaren Flecken treten hier zwei verschiedene magnetische Polaritäten in stark gemischter Form auf, die als weiße und schwarze Flächen dargestellt werden (siehe Abbildung 4.4). Innerhalb der Gruppe entsteht so eine Trennlinie in Ost-West-Richtung, die auch als magnetische Inversionslinie (engl. polarity inversion line, PIL) bezeichnet wird. Bei dieser Fleckengruppe handelt es sich um eine Überlagerung von mehreren Sonnenfleckstrukturen, die beim Zeitpunkt der größten Aktivität 94 Einzelflecken enthält. Darunter auch mindestens zwei  $\delta$ -Flecken, wie dem Kontinuumsbild und dem Magnetogramm zu entnehmen ist. Seit der ersten Beobachtung auf der Sonnenscheibe



**Abbildung 5.6:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11967. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-3}$  sind, und rote Vektoren entsprechen Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

am 28. Januar 2014 zeichnet sich NOAA 11967 durch eine sehr hohe Aktivität aus. Sie ist während der Zeitspanne ihrer Anwesenheit auf der sichtbaren Scheibe der bevorzugte Ort für Sonneneruptionen und produziert mehrere C- und M-Klasse Strahlungsausbrüche. Im Laufe der Beobachtungszeit wächst die Ausdehnung und Sonnenfleckenanzahl stetig an, bis sie am 5. Februar 2014 eine maximale Ausdehnung von  $1400 \mu\text{H}$  erreicht. Im weiterem Verlauf zerfällt die Gruppe zunehmend, bis sich zwei neue, räumlich getrennte Sonnenfleckenregionen herauskristallisieren.

Die bei den isolierten Flecken beobachtete Moat-Strömung tritt auch bei dieser Fleckengruppe auf. Die Strömungskarte in Abbildung 5.6 zeigt, dass der Großteil der Strömung vom östlichen Teil der Gruppe und vom Einzelfleck im westlichen Teil ausgeht. Interessant ist hierbei die Wechselwirkung der Moats der großen Flecken in westlicher Richtung der Gruppe. An dieser Stelle kommt es anscheinend zu einer Überlagerung der Strömungen in nördlicher Richtung. An der Inversionslinie treten Scherrströmungen auf, welche besonders gut im Magnetogramm erkennbar sind. Hier verläuft die Strömung im schwarzen Bereich in nord-östlicher Richtung und im weißen Bereich entgegengesetzt in nord-westlicher Richtung.

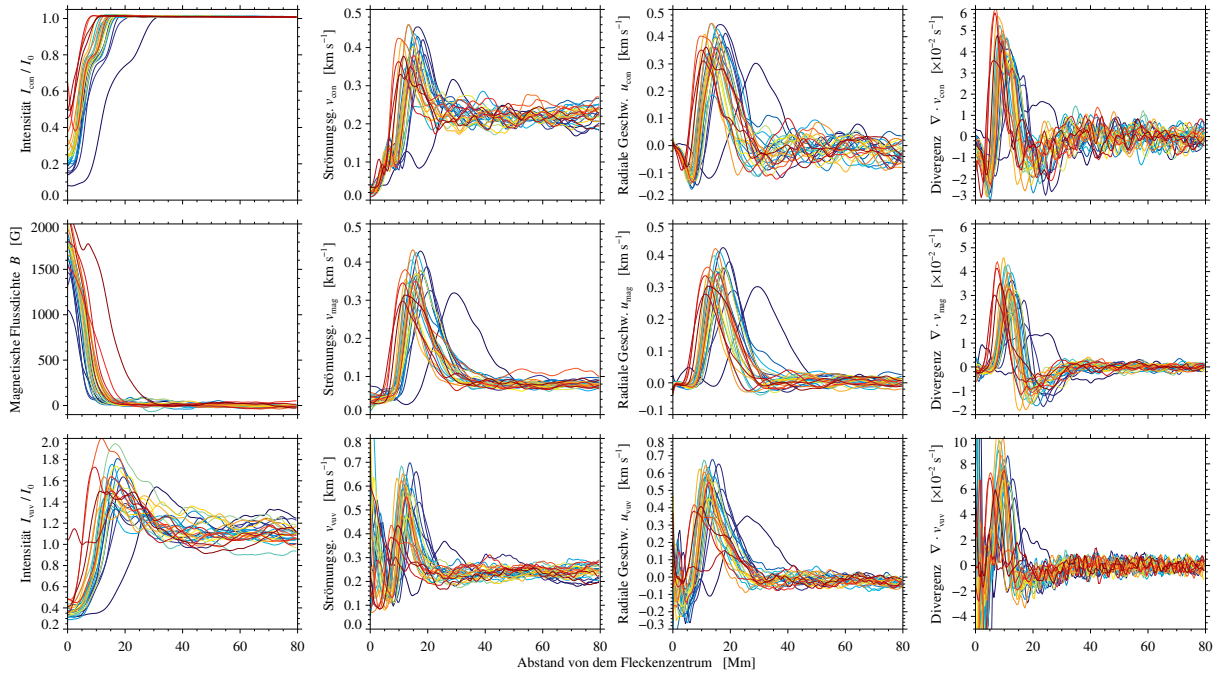
### 5.3 Azimutal gemittelte Strömungsparameter

Um verschiedene Sonnenflecken besser vergleichen zu können, werden die Intensitätsverläufe, die gemessene Strömungsgeschwindigkeit und die Divergenz der Strömungen gegen den zunehmenden Radius in Abbildung 5.7 dargestellt. Die erste Reihe der abgebildeten Diagramme beinhaltet die Analyse der Kontinuumsbilder. Die zweite Reihe thematisiert die Magnetogramme und die letzte Reihe schließlich die VUV Bilder. Auf der linken Seite ist die normierte, radiale Intensität  $I/I_0$  bzw. die magnetische Flussdichte  $B$  abgebildet. Der horizontale Geschwindigkeitsvektor  $v = (v_x, v_y)$  füllt die zweite Spalte, wobei das Vorzeichen Ein- bzw. Ausströmungen anzeigt. Die, in der dritten Spalte erkennbare, radiale Strömungsgeschwindigkeit ist die radiale Komponente des horizontalen Geschwindigkeitsvektors  $v$ ,  $u = v_x \cos \varphi + v_y \sin \varphi$ , wobei  $\varphi$  der Azimutwinkel um das Fleckenzentrum ist, welcher gegen den Uhrzeigersinn in positiver  $x$ -Richtung gemessen wird. Die Divergenz  $\nabla \cdot v = \partial v_x / \partial x + \partial v_y / \partial y$  wird für digitale Daten mit dem Differenzenquotient berechnet.

#### 5.3.1 Intensitätsverlauf mit zunehmenden Radius

##### Magnetogramme

Die magnetische Flussdichte nimmt mit steigendem Abstand zum Fleckenzentrum schnell ab und verschwindet am Rand des Flecks nahezu vollständig. Es ist anzunehmen, dass das Magnetfeld zwischen den Flecken vergleichsweise schwach ist. Dabei erscheint das Magnetfeld in kleinskaligen Flussröhren,



**Abbildung 5.7:** Verläufe charakteristischer Parameter, die für 26 unipolare Flecken gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Die einzelnen Flecken sind nach Größe sortiert und der Farbfolge des Regenbogenspektrum entsprechend aufgetragen. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt. Die Farbe der jeweiligen Linie verweist auf die dazugehörige aktive Region.

die über die gesamte Sonne verteilt sind, wobei der Bereich zwischen diesen nahezu feldfrei ist ([Unsöld und Baschek, 1988](#)).

### Kontinuum

Die Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}$  nimmt rasch zu, bevor sie am Rand der Penumbra in die Intensität der ruhigen Sonne  $I_0$  übergeht. Dabei tritt im Bereich der Penumbra ein Wendepunkte auf, an der die zweite Ableitung des Intensitätsverlaufs gleich Null wird. An dieser Stelle geht die Umbra in die Penumbra über, wo die Kontinuumsintensität wesentlich größer ist.

### Vakuultraviolett

Im Gegensatz zur Kontinuumsintensität strebt die VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  nicht den Wert der umliegenden Sonne an, sondern steigt kontinuierlich an und überschreitet  $I_0$ . Der äußere Rand der Penumbra markiert das Maximum der Intensität. Diese fällt zunächst im weiteren Verlauf auf die Umgebungsintensität zurück. Nach ca. 20 Mm wird jedoch ein lokales Maximum erreicht, bevor sie sich bei einer Intensität von etwa  $1,2 \times I_0$  einpendelt. Dies ein Hinweis auf die umgebende Supergranulationszelle, da der Einzelfleck in eine Supergranule eingelagert ist (vergleiche [Rieutord und Rincon, 2010](#)) und somit die Moat-Strömung bis zum Rand der Supergranule erfolgt.

### 5.3.2 Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmenden Radius

Im Vergleich der ausgewählten Sonnenflecken in [Abbildung 5.7](#) ist ein einheitlicher Trend erkennbar, wonach die Geschwindigkeit am Rand des Sonnenflecks maximal ist. Auffällig ist, dass die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei mittelgroßen Flecken maximal ist. Sowohl bei den kleineren, als auch bei den größeren Flecken ist die maximale Strömungsgeschwindigkeit geringer. Anscheinend gibt es eine optimale Fleckengröße für Strömungsgeschwindigkeit. Diese sollte, nach Betrachtung der vorliegenden Daten, in einem Bereich von 10–17 Mm liegen.

## Magnetogramme

Bei der Betrachtung der Flusstransportgeschwindigkeit im Magnetogramm ist zunächst eine stark ansteigende Geschwindigkeit erkennbar, die am Rand der Penumbra (beim mittleren Sonnenfleck etwa bei 15 Mm) einen Maximalwert von über  $0,3 \text{ km s}^{-1}$  erreicht. Im weiteren Verlauf nimmt die Geschwindigkeit stetig ab und nimmt abschließend einen nahezu konstanten Wert von  $0,08 \text{ km s}^{-1}$  an. Bei NOAA 11899 ist zusätzlich ein lokales Maximum am Rand der Umbra erkennbar. Dieser Effekt tritt vermutlich bei allen Sonnenflecken auf, wird jedoch erst bei ausreichend ausgedehnten Flecken im graphischen Verlauf deutlich. Im Fall der radialen Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich ein V-förmiges Profil mit ausgeprägtem Maximum, wobei jedoch hier die Strömung jenseits des Sonnenflecks zum Erliegen kommt.

## Kontinuum

Das Strömungsfeld im Fall des Kontinuumsbildes ist wesentlich komplexer. Jedoch handelt es sich in diesem Fall wieder um einen ähnlichen Verlauf mit Maximalwert am Fleckenrand, wobei vorerst eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit zur Fleckengröße zu beobachten ist. Dieser Zusammenhang hat sich jedoch in Anbetracht der im Anhang enthaltenen Sonnenflecken nicht bestätigen können. Die Maximalwerte bewegen sich in einem Korridor von  $0,3\text{--}0,4 \text{ km s}^{-1}$ . Der Verlauf außerhalb des Flecks ist nicht kontinuierlich abnehmend, sondern alterniert in einem Bereich um  $0,1 \text{ km s}^{-1}$ . Zwar nimmt die Geschwindigkeit auch hier ab, erreicht aber keinen konstanten niedrigen Wert. Das hat zur Folge, dass im Bereich der ruhigen Sonne die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit höher ist als innerhalb des Sonnenflecks. Bei der radialen Strömungsgeschwindigkeit treten am Rand der Umbra negative Geschwindigkeiten von bis zu  $1,3 \text{ km s}^{-1}$  auf, was auf eine nach innen gerichtete Bewegung hinweist. Wieder kann von einem V-Profil gesprochen werden, welche sich mit steigenden Radius bei einer Geschwindigkeit von  $\pm 0,1 \text{ km s}^{-1}$  einpegelt. Dies deutet auf eine stochastische Bewegung der ruhigen Sonne hin, die jedoch nicht durch die Moat-Strömung verursacht wird. Es kann auch ein Artefakt sein, wenn azimuthal über das Granulationsmuster gemittelt wird.

## Vakuultraviolett

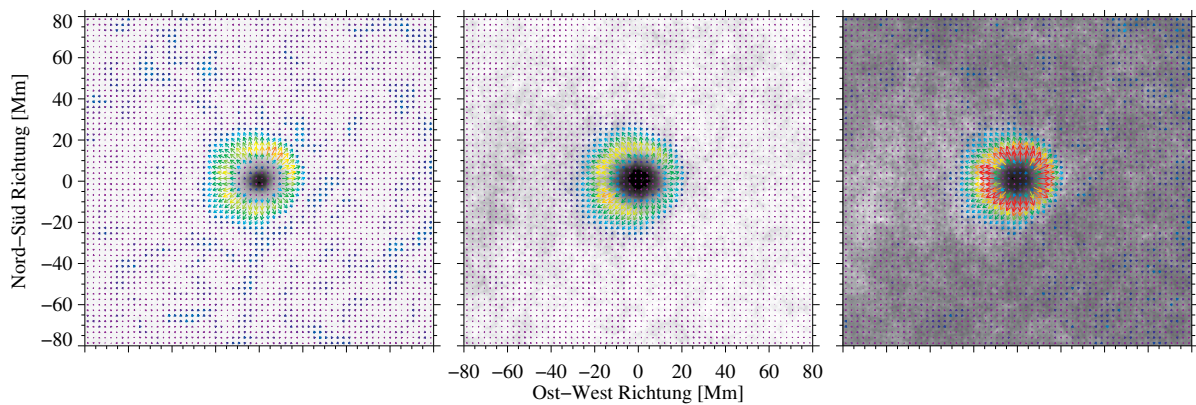
Im VUV-Bereich unterscheidet sich das Strömungsfeld leicht von den anderen Betrachtungen, da hier eine starke Strömung von bis zu  $0,35 \text{ km s}^{-1}$  in der Nähe des Fleckenzentrums zu finden ist. Kurz darauf setzt ein lokales Minimum ein, welches den Ort der Umbra kennzeichnet, wo nur wenig Strömung gemessen wird. Am Rand der Penumbra ist die Geschwindigkeit maximal und fällt mit zunehmenden Abstand rasch ab, bevor sie sich in der Regel nach etwa 5–10 Mm auf eine konstanten Geschwindigkeit von ca.  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  einpegelt.

### 5.3.3 Radiale Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmenden Radius

Die radiale Strömungsgeschwindigkeit verhält sich die ähnlich wie horizontale Geschwindigkeit, da sie die radiale Komponente des horizontalen Geschwindigkeitsvektors ist. Anhand des Vorzeichens kann jedoch zusätzlich zum Betrag noch die Richtung der Strömung bestimmt werden. Eine positive Geschwindigkeit verläuft radial nach außen, während eine negative Geschwindigkeit eine Strömung nach innen kennzeichnet. Für die Magnetogramme ergeben sich keine Unterschiede (siehe Kapitel 5.3.2). Auf den Kontinuumsbildern und VUV-Aufnahmen ist bei ca. 3–9 Mm ein globales Minimum erkennbar. In dieser Region befindet sich der Rand der Umbra. Hier ist anscheinend die nach innen gerichtete Strömung maximal, wobei Geschwindigkeiten von ca.  $-0,15 \text{ km s}^{-1}$  bzw. ca.  $-0,25 \text{ km s}^{-1}$  erreicht werden. Auf die maximale Strömungsgeschwindigkeit am Rand der Penumbra folgt eine stochastische Bewegung um Null in der ruhigen Sonne, wo die Strömung zum Erliegen gekommen ist.

### 5.3.4 Divergenzverlauf mit zunehmenden Radius

Die Divergenz des Strömungsfeldes ist am Rand des Sonnenflecks maximal, d.h. es strömt an dieser Stelle viel mehr aus der Umgebung dieses Punkts hinaus als in ihn hineinfließt. Hier tritt somit eine Quelle auf, die als Ausgangspunkt für das umliegende Strömungsfeld dient. Mit zunehmenden Radius oszilliert



**Abbildung 5.8:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren, von links nach rechts, auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm von 26 gemittelten Sonnenflecken. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren entsprechen Geschwindigkeiten, die größer als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

die Divergenz um einen Wert von Null, sodass im Mittel um den Sonnenfleck herum keine Divergenz auftritt. Dennoch kann diese Fläche nicht als quellfrei angesehen werden, denn das Granulationsmuster weist sowohl Senken als auch Quellen auf. Da dieses Muster isotrop ist, kommt es bei der azimuthalen Mittlung um den Fleckenursprung zu den oben angeführten Oszillationen. Eine Ausnahme zu diesem Verlauf stellt NOAA 11899 dar. Hier treten an zwei Stellen Quellen auf und zwar jeweils in der Mitte der Umbra bzw. Penumbra, wobei die äußere Extremalstelle größer ist. Dies liegt vermutlich wieder an der azimuthalen Mittlung über das Granulationsmuster. Hieraus lässt sich schließen, dass bei den kleineren Flecken auch zwei Quellen auftreten, die sich jedoch überlagern, sodass ein großes globales Maximum entsteht.

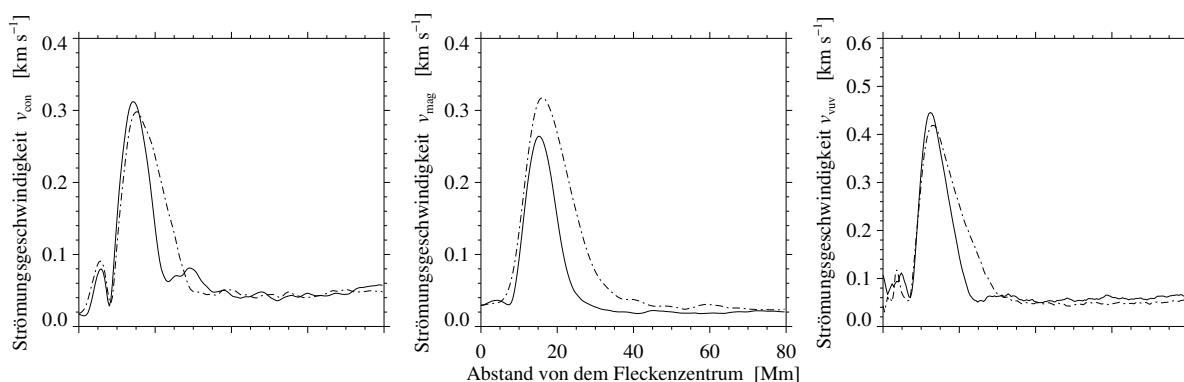
## 5.4 Ost-West Asymmetrie

An dieser Stelle soll geprüft werden, ob eine Ost-West Asymmetrie der Strömung vorliegt, wie sie [Sobotka und Roudier \(2007\)](#) beobachtet haben. Zu diesem Zweck wurden die Aufnahmen aller 26 Sonnenflecken gemittelt. Somit konnte ein prototypischer Modelfleck erzeugt werden mit einer Ausdehnung von etwa 14 Mm. Strömungskarten dieses Modelflecks sind in [Abbildung 5.8](#) dargestellt. Auf der östlichen Seite ist eine deutliche Konzentration von Strömungsvektoren mit großen Geschwindigkeiten zu sehen. Die Anhäufung der größeren Strömungsvektoren auf der Ostseite ist ein Effekt, der verschiedene Ursachen haben kann. So muss im Magnetogramm berücksichtigt werden, dass der beobachtete Fleck in der Regel als vorangehender Fleck auftritt, dem ein zweiter Fleck mit umgekehrter Polarität folgt. Das hat zu Folge, dass eine Strömung entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung auftritt. Nichtsdestotrotz ist auf den Kontinuumsbildern der vorausgesagte Effekt deutlich sichtbar.

Anschließend wurden die azimuthal gemittelten Strömungsgeschwindigkeit für die Ost- und Westrichtung bestimmt, um die Mittlungsprozedur zu vereinfachen. Hierzu wurde eine Spiegelung an der Nord-Südlinie vorgenommen.

[Abbildung 5.9](#) zeigt, dass die mit einer durchgezogenen Linie gekennzeichnete, östliche Seite eine stärkere Strömung hat als die mit einer gestrichelten Linie dargestellte, westliche Seite. Für die Kontinuumsbilder und VUV Bilder sind die maximalen Geschwindigkeiten etwas geringer. Hingegen ist im Magnetogramm die maximale Strömungsgeschwindigkeit wesentlich größer. Es ist davon auszugehen, dass weitere Effekte eine Rolle spielen. Die Auswirkungen von diesen Einflüssen, wie etwa die der differentiellen Rotation und der Strömung zwischen dem führenden und folgenden Fleck, stellt eine interessante Frage für weitergehende Untersuchungen dar, innerhalb dieser Arbeit fehlen aber die notwendigen Daten. Die abgedeckte Fläche der dargestellten Strömung und die Halbwertsbreite ist jedoch in allen drei Fällen größer. Der Anstieg zum Maximum ist jeweils nahezu identisch, während der Verlauf nach dem Maximum asymmetrisch und geringer ist als im westlichen Abschnitt. Mit der gezeigten Ost-West





**Abbildung 5.9:** Betrag der Strömungsgeschwindigkeit für das Kontinuumsbild, Magnetogramm und VUV Bild mit zunehmenden Radius für den gemittelten, prototypischen Fleck. Die durchgezogene Linie zeigt die östliche Strömung und die gestrichelte Linie zeigt die westliche Strömung

Asymmetrie konnte die Beobachtung von [Sobotka und Roudier \(2007\)](#) bestätigt werden.

## 5.5 Zusammenhang von Magnetfeldstärke und Intensität

Im Folgenden soll geprüft werden, ob die maximale magnetische Flussdichte  $B_{\max}$  mit der minimalen Umbraintensität  $I_{\min}/I_0$  oder der minimalen VUV-Intensität  $I_{\text{VUV}}/I_0$  korreliert ist. Hierzu werden diese in [Abbildung 5.10](#) gegeneinander aufgetragen. In dem jeweiligen Streudiagramm ist ein linearer Zusammenhang zu erkennen, welcher mithilfe der Pearson-Korrelation bestimmt werden kann. Der Korrelationskoeffizient  $r$  nimmt Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  an. Je dichter  $r$  bei Null liegt, desto schwächer ist der lineare Zusammenhang und umso stärker je näher  $r$  bei  $-1$  oder  $+1$  liegt. Ist der Korrelationskoeffizient  $r > 0$ , so liegt ein linearer Zusammenhang vor, ist  $r < 0$  so besteht ein umgekehrt linearer Zusammenhang. Kein linearer Zusammenhang liegt vor, wenn  $r = 0$  ist. Der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson kann auf folgende Weise bestimmt werden ([Hartung, Elpelt und Klösener, 2005](#)):

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

hierbei sind  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die empirischen Mittelwerte. Eine weitere Möglichkeit diese Abhängigkeit auszudrücken, ist der Spearmans Rangkorrelationskoeffizient. Im Gegensatz zum Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson wird nach Spearman allerdings kein linearer Zusammenhang vorausgesetzt. Dieser lässt sich nach [Hartung, Elpelt und Klösener \(2005\)](#) als

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (rg(x_i - r\bar{g}_x)(rg(y_i - r\bar{g}_y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (rg(x_i - r\bar{g}_x))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (rg(y_i - r\bar{g}_y))^2}}$$

berechnen, wobei  $rg(x_i)$  der Rang von  $x_i$  und  $r\bar{g}_y$  der Mittelwert der Ränge von  $x$  ist. Daraus resultieren die Ergebnisse in [Tabelle 5.1](#).

Abhängigkeit von der maximalen magnetischen Flussdichte $B_{\max}$	$r_{x,y}$	$r_s$
minimale Umbraintensität $I_{\min}/I_0$	$-0,728$	$-0,604$
minimale VUV-Intensität $I_{\text{VUV}}/I_0$	$-0,614$	$-0,355$

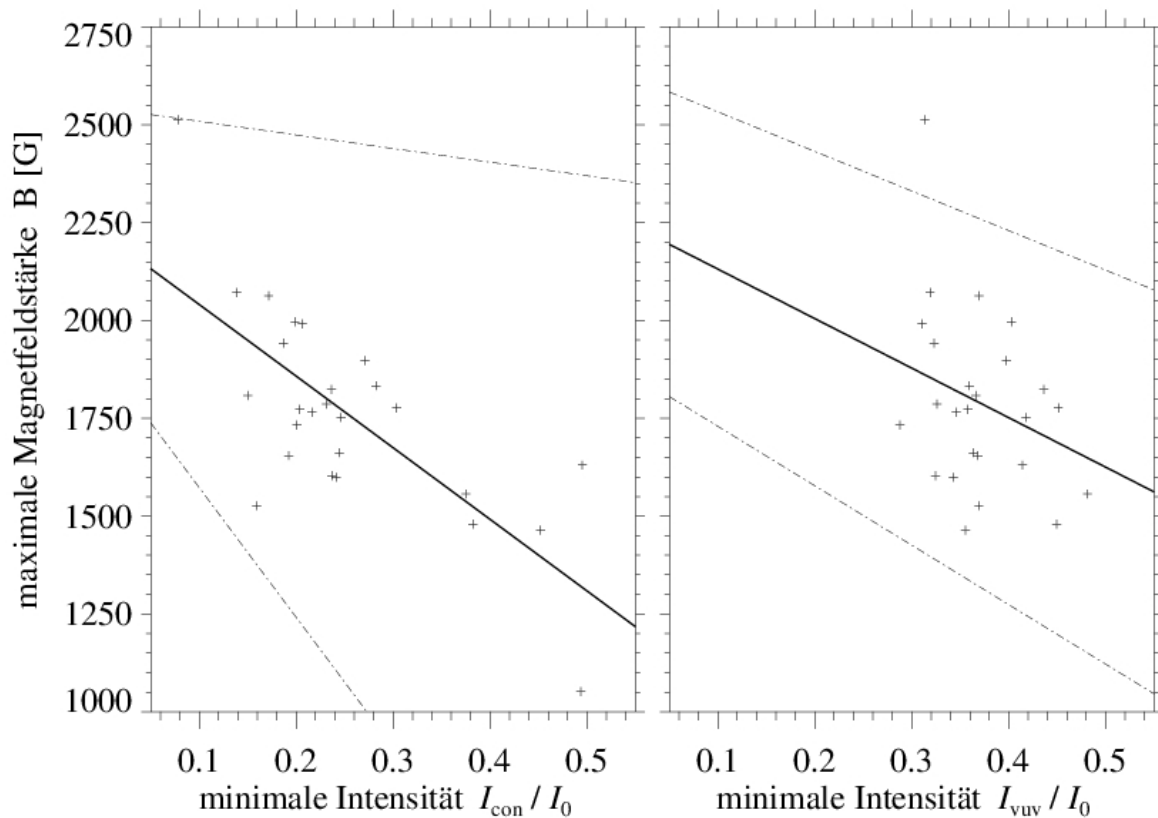
**Tabelle 5.1:** Abhängigkeit der maximalen magnetischen Flussdichte  $B_{\max}$  von der minimalen Umbraintensität  $I_{\min}/I_0$  und der minimalen VUV-Intensität  $I_{\text{VUV}}/I_0$ . Die Abhängigkeit wird mit dem Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson  $r_{x,y}$  und Spearman  $r_s$  bestimmt.

Der Korrelationskoeffizient liefert jedoch keine Informationen zur Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen der Flussdichte und der Intensität. Die Interpretation des numerischen Werts gibt dabei nur Hinweise, ob eine Abhängigkeit vorliegt. Stark und schwach sind in diesem Falle jedoch relative Begriffe. Welche von beiden Größen die abhängige und welche die unabhängige ist oder ob sich beide Größen gegenseitig beeinflussen wird nicht geklärt. Ebenfalls ungeklärt bleibt, ob eventuell eine Scheinkorrelation vorliegt. Der Verlauf der Abhängigkeit lässt sich mit Hilfe folgender linearen Regressionsgeraden ermitteln:

$$B(I_{\min})/1G = -1830 \cdot I_{\min}/I_0 + 2223,88$$

$$B(I_{\text{VUV}})/1G = -1265 \cdot I_{\text{VUV}}/I_0 + 2257,88$$

Die lineare Regression ist als durchgezogene Linie im jeweiligen Diagramm abgebildet. Die gestrichelte Linie kennzeichnet das Gebiet in dem der überwiegende Teil aller Punkte liegt. Deutlich zu erkennen ist, dass im Fall der minimalen VUV-Intensität  $I_{\text{VUV}}/I_0$  alle Punkte (außer einem Ausreißer) in einem schmalen Gebiet liegen. Hingegen sind die Punkte für die minimalen Umbraintensität  $I_{\min}/I_0$  mehr gestreut. In Anbetracht der Daten kann fest gehalten werden, dass die minimale Umbraintensität  $I_{\min}/I_0$  mit einem Rangkorrelationskoeffizienten von  $> 0,6$  und der Verteilung im Streudiagramm mit der maximalen magnetischen Flussdichte  $B_{\max}$  korreliert. Die Umbraintensität ist somit bei einer großen magnetischen Flussdichte minimal, da das Magnetfeld die Konvektion beeinträchtigt, also den Energietransport in der Konvektionszone behindert. Die minimale VUV-Intensität  $I_{\text{VUV}}/I_0$  weist hingegen mit einem deutlichen geringeren Rangkorrelationskoeffizienten nur einen vergleichsweise schwachen Zusammenhang auf. Das deutet darauf hin, dass ein starkes Magnetfeld im VUV-Bereich weniger Auswirkung auf die Intensität hat. Der Grund für diese unterschiedlichen Auswirkungen liegt an den verschiedenen beobachteten Wellenlängen. Bei den AIA-Daten wird vor allem die untere Chromosphäre bei 160 nm betrachtet. Während die HMI-Bilder bei 617,3 nm aufgenommen wurden und somit Geschwindigkeits- und Magnetfelder in der Photosphäre vermessen.



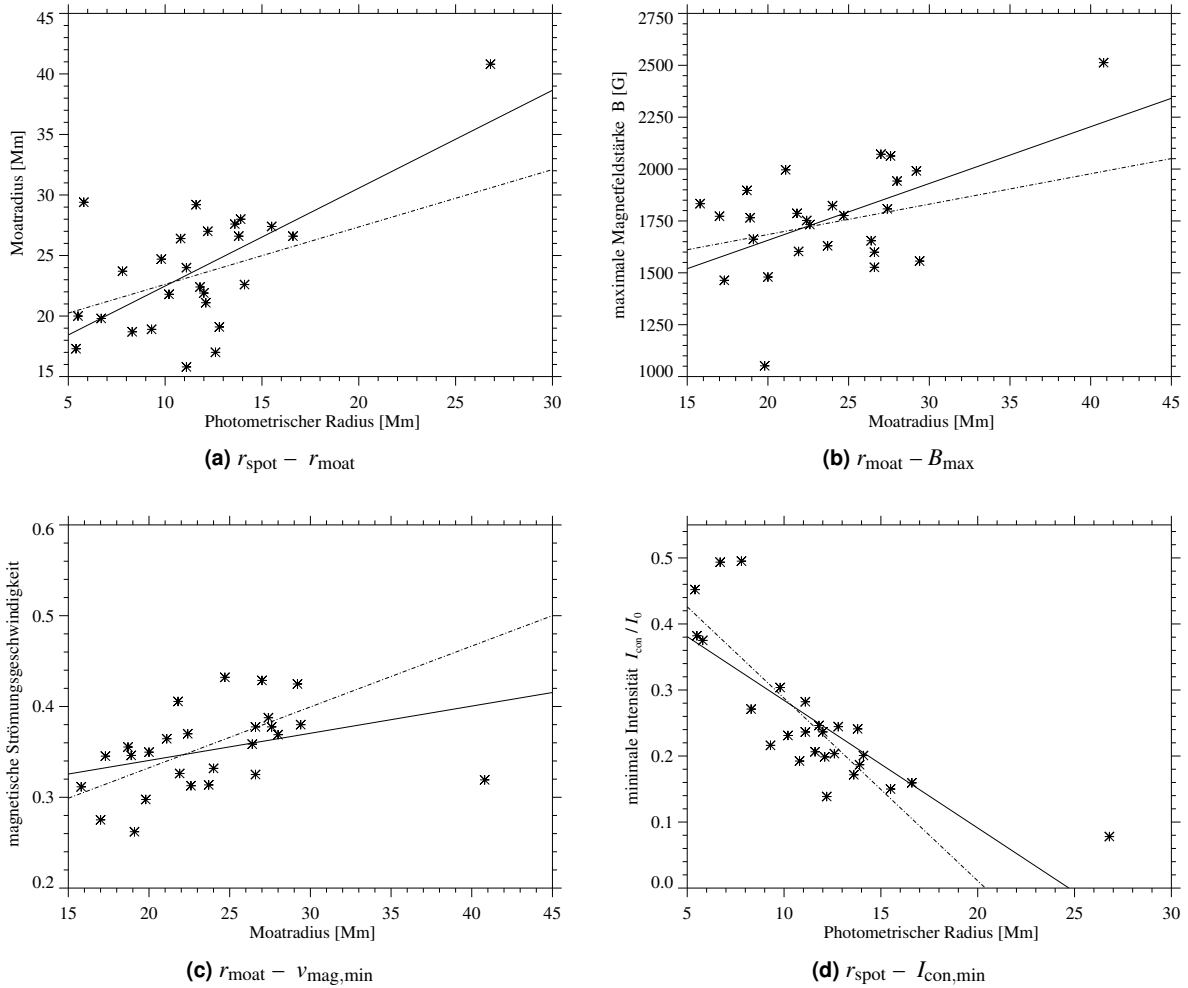
**Abbildung 5.10:** Abhängigkeit der minimalen Umbraintensität  $I_{\text{min}}/I_0$  und der minimalen VUV-Intensität  $I_{\text{VUV}}/I_0$  von der magnetischen Flussdichte  $B_{\text{max}}$ . Die durchgezogene Linie repräsentiert einen linearen Fit, wohingegen die gestrichelten Linien das Gebiet in dem der überwiegende Teil aller Punkte liegt markieren.

## 5.6 Einfluss der Fleckengröße

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der Moatgröße und der photometrischen Fleckengröße auf verschiedene Parameter geprüft werden. Dies betrifft sowohl den Zusammenhang zwischen den beiden Größen, als auch den Zusammenhang zur magnetischen Flussdichte und zu den Strömungsgeschwindigkeiten.

Die Hypothese, dass die Moatgröße direkt proportionell zur Fleckengröße ist, scheint nahe zu liegen und soll in [Abbildung 5.11\(a\)](#) geprüft werden. In der Tat sind die Werte mit einem Korrelationsfaktor nach Bravais und Pearson von 0,65 korreliert. Lässt man jedoch den großen Fleck NOAA 11899 außen vor, sinkt der Korrelationskoeffizient auf 0,36 ab, was bei einem starken Zusammenhang nicht zu erwarten wäre. Der große Fleck täuscht somit eine stärkere Korrelation vor. Ein Anstieg des Moatradius mit steigender Fleckengröße ist zwar erkennbar, jedoch führt ein größerer Fleck nicht zwangsläufig zu einer größeren Moatgröße.

Anscheinend sind für die Moatgröße noch weitere Faktoren von Bedeutung, deshalb soll die Verbindung zur maximalen magnetischen Flussdichte geprüft werden. Im selben Zug soll ebenfalls geprüft werden, ob die maximale magnetische Flussdichte mit der Fleckengröße zusammenhängt (siehe [Abbildung 5.11\(b\)](#)). Hier kann in beiden Fällen von einer schwachen Abhängigkeit gesprochen werden. Somit hat das Magnetfeld wenig Einfluss auf die Größenentwicklung eines Sonnenflecks. Ein große maximale magnetische Flussdichte weist somit auch nicht auf einen besonders großen Sonnenfleck hin.



**Abbildung 5.11:** Streudiagramme der verschiedenen Abhängigkeit von der Moatgröße und der photometrischen Fleckengröße. Eingezeichnet ist der lineare Trend mit (durchgezogene Linie) und ohne (gestrichelte Linie) NOAA 11899

Ebenfalls von Interesse ist die Verbindung von anderen Parametern zur Fleckengröße bzw Moatgröße, welche in Tabelle 5.2 aufgelistet sind. In dieser Tabelle werden verschiedene Abhängigkeiten geprüft und Korrelationskoeffizienten zugeordnet. Hierbei sollte vor allem überprüft werden, ob die in Kapitel 5.3.2 aufgestellte Hypothese, dass für eine Fleckengröße von 10–17 Mm die Strömungsgeschwindigkeit maximal ist, nachweisbar ist. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass keine Abhängigkeit zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten und dem photometrischen Radius vorliegt. Hingegen ist die Moatgröße mit den Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{\text{con,max}}$  und  $v_{\text{mag,max}}$  korreliert, wie Abbildung 5.11(c) zeigt. Es wurde festgestellt, dass Flecken mit einem großen Moat eine größere maximale Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{mag,max}}$  aufwiesen. Kein Zusammenhang besteht indes zwischen der Moatgröße und den Vakuumultraviolettparametern  $I_{\text{VUV}}$  und  $v_{\text{VUV,max}}$

Auffällig ist, dass die minimale Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}$  (siehe Abbildung 5.11(d)) im hohen Grad mit der Fleckengröße korreliert ist. Das heißt je größer der Fleck ist, desto kleiner ist die Intensität im Fleckenzentrum. Abschließend lässt sich feststellen, dass ein Zusammenhang der Moatgröße zu verschiedenen Parametern hergestellt werden konnte. Insbesondere ist die maximale Strömungsgeschwindigkeit eng mit der Ausdehnung des Moats verknüpft. Besonders gut war der Einfluss des Moats in den Kontinuumsbildern bei  $I_{\text{con,min}}$  und  $v_{\text{con,max}}$  sichtbar. Im VUV-Bereich ist der Einfluss hingegen nicht beobachtbar.

Abhängigkeit	$r_{x,y}$		$r_s$	
	mit NOAA 11899	ohne NOAA 11899	mit NOAA 11899	ohne NOAA 11899
$r_{\text{spot}} - r_{\text{moat}}$	<b>0.66</b>	0.36	0.44	0.37
$r_{\text{spot}} - v_{\text{vuv,max}}$	-0.08	0.30	0.13	0.27
$r_{\text{spot}} - v_{\text{con,max}}$	-0.22	-0.02	-0.10	-0.01
$r_{\text{spot}} - v_{\text{mag,max}}$	-0.09	0.01	-0.05	0.01
$r_{\text{spot}} - I_{\text{vuv,max}}$	-0.17	-0.19	-0.04	-0.05
$r_{\text{spot}} - I_{\text{vuv,min}}$	-0.40	-0.45	-0.52	-0.47
$r_{\text{spot}} - I_{\text{con,min}}$	<b>-0.78</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.80</b>	<b>-0.77</b>
$r_{\text{spot}} - B_{\text{max}}$	<b>0.67</b>	0.46	0.42	0.35
$r_{\text{moat}} - v_{\text{vuv,max}}$	-0.03	0.31	0.06	0.19
$r_{\text{moat}} - v_{\text{con,max}}$	0.23	<b>0.58</b>	<b>0.59</b>	0.44
$r_{\text{moat}} - v_{\text{mag,max}}$	0.36	<b>0.61</b>	<b>0.64</b>	<b>0.53</b>
$r_{\text{moat}} - I_{\text{vuv,max}}$	-0.06	0.40	-0.10	-0.12
$r_{\text{moat}} - I_{\text{vuv,min}}$	-0.19	-0.15	-0.16	-0.07
$r_{\text{moat}} - I_{\text{con,min}}$	-0.46	-0.34	<b>-0.51</b>	-0.44
$r_{\text{moat}} - B_{\text{max}}$	<b>0.54</b>	0.27	0.30	0.21

**Tabelle 5.2:** Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson  $r_{x,y}$  und Spearmans Rangkorrelationskoeffizient  $r_s$  für mögliche Abhängigkeiten. Signifikante Korrelationen von  $|r| > 0,5$  sind farblich hervorgehoben.

# Kapitel 6

## Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit Hilfe des LCT und DAVE die horizontalen Geschwindigkeitsfelder in der Umgebung von Sonnenflecken zu analysieren. Im Mittelpunkt standen hierbei, die generellen Eigenschaften der Strömungen und die bisherigen Kenntnisse zu überprüfen.

Zu diesem Zweck wurden Zeitserien von 26 achsensymmetrischen, unipolaren Sonnenflecken mit einer Dauer von 12 Stunden betrachtet, die mit Hilfe von Daten des Satelliten Solar Dynamics Observatory (SDO) erstellt wurden. Aus diesen Daten wurden Strömungskarten für die Flecken erzeugt. Diese erlauben es, ein Bild der Strömungen zu machen, die im Zusammenhang mit den Sonnenflecken stehen. Hierbei war vor allem ein besonders großer Fleck in der aktiven Region NOAA 11899 von Interesse, da es so möglich war, eine Verbindung zu verschiedenen Fleckengrößen herzustellen. Da unipolare Flecken aber nur einen kleinen Anteil der Gesamtanzahl von Sonnenflecken ausmachen, wurde noch die besonders große aktive Region NOAA 11967 betrachtet, da hier eine ausgedehnte Fleckengruppe enthalten ist, die eine Vielzahl von Flecken umfasst.

Insbesondere die Moat-Strömungen, die den jeweiligen Sonnenfleck umschließen, werden in den Strömungskarten sehr deutlich sichtbar. Desweiteren wurden Anzeichen gefunden, dass Einzelflecken in einer Supergranule eingelagert sind, wie es Meyer *et al.* (1979) vorhergesagt haben. Eine solche Supergranule mit einer durchschnittlichen Ausdehnung von ca. 30 Mm (Rieutord und Rincon, 2010) konnte insbesondere in der aktiven Region NOAA 11967 beobachtet werden. Der Grund liegt hierfür in der außergewöhnlichen Größe jenes Flecks mit einem Radius von 26,8 Mm. Diese Größe führt dazu, dass der zugehörige Moat sich mit der der Supergranule überlagert. Ansonsten gibt es bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten keinen Unterschied zu anderen unipolaren Flecken.

Die Verbindung der Fleckenausdehnung zur Moatgröße wirft die Frage auf, ob es möglich ist eine allgemeingültige Aussage für alle Sonnenflecken herzustellen. Folgerichtig war die Suche nach diesen Zusammenhängen ebenso Teil der Arbeit. Die Abhängigkeit der Moatgröße vom photometrischen Radius konnte mit einer mittleren Korrelation festgestellt werden. Dieses Ergebnis widerspricht jedoch der Arbeit von Löhner-Böttcher und Schlichenmaier (2013), in der festgestellt wurde, dass die Ausdehnung des Moat-Flows unabhängig von der Fleckengröße ist. In deren Arbeit wurden die Geschwindigkeitskarten mithilfe von Dopplergramm für 31 Sonnenflecken bestimmt. Dabei wurde die Annahme verwendet, dass die Strömungsregionen symmetrisch sind. Sobotka und Roudier (2007) schlussfolgern ebenfalls eine nahezu vollständige Unabhängigkeit von Moat- und Fleckenradius, aber beobachteten wiederum eine Ost-West Asymmetrie der Moat-Strömung.

Um diese Beobachtung überprüfen zu können wurde ein prototypischer Modelfleck erschaffen, der die typischen Eigenschaften eines unipolaren, achsensymmetrischen Flecks auf sich vereinigt. Zu diesem Zweck wurden die 26 Flecken jener Kategorie gemittelt. Erzeugt man für diesen Modelfleck nun die zugehörigen Strömungskarten ist die vorhergesagte Asymmetrie deutlich erkennbar. Vor allem im Magnetogramm ist eine sehr starke östliche Ausdehnung des Strömungsfelds messbar. Der Grund für diese deutliche Vorzugsrichtung ist ein lohnenswertes Thema für eine anschließende Arbeit, in der die Auswirkungen der differentiellen Rotation oder der Strömung zwischen dem führenden und folgenden Fleck eingehender zu untersuchen sind. Für eine weiterführende Studie fehlen jedoch im Rahmen dieser Arbeit die Daten und letztendlich schlicht die Zeit.

Ein weiterer interessanter Aspekt der Arbeit beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen Strö-

mungen und Fleckengröße. Er betrifft in erster Line die Einflüsse der Strömungen auf den photometrischen Radius. Des Weiteren wird analysiert, in welchem Grad die Moat-Strömung Parameter, wie die Intensität oder magnetische Feldstärke, beeinflusst beziehungsweise mit ihnen zusammenhängt.

Insbesondere die Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}$  ist eng mit der Fleckengröße verknüpft. Die Moatgröße ist hingegen mit den Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{\text{con}}$  und  $v_{\text{mag}}$  korreliert, die Geschwindigkeiten von  $0,4\text{--}0,5 \text{ km s}^{-1}$  erreichen. Auffälligerweise ist die Strömungsgeschwindigkeit bei einer Fleckengröße von  $10\text{--}17 \text{ Mm}$  maximal. Hierbei muss es sich um einen nichtlinearen Zusammenhang handeln, da ein linearer Zusammenhang in der Arbeit ausgeschlossen wurde. Geschwindigkeiten der Moatströmung von  $0,5\text{--}0,7 \text{ km s}^{-1}$ , wie sie von [Brickhouse und Labonte \(1988\)](#) beschrieben werden, erreichen indes nur die Geschwindigkeiten im Vakuumultraviolett  $v_{\text{vuv}}$  bei  $160 \text{ nm}$ .

Im Anschluss zu dieser Arbeit werden noch weitere umfassendere Untersuchungen notwendig sein, um diese Ergebnisse zu bestätigen und gegebenenfalls daraus resultierende Folgen zu untersuchen. Vom großen Interesse ist dabei, ob sich diese Erkenntnisse auch auf alle Sonnenflecken anwenden lassen oder ob sich diese Eigenschaften nur auf achsensymmetrische, unipolare Flecken beschränken. So gibt es womöglich einen Einfluss der heliografische Breite auf die Effekte, sodass es zum Beispiel größere Strömungen auf dem Sonnenäquator geben könnte. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Verbindung zur Evershed-Strömung die in dieser Arbeit nur am Rande Beachtung fand.

# Literaturverzeichnis

- Balthasar, H., Woehl, H.: 1983, On the Determination of Heliographic Positions and Rotation Velocities of Sunspots. II. Systematic Effects Caused by the Wilson Depression. *Solar Phys.* **88**, 71–75. doi:[10.1007/BF00196178](https://doi.org/10.1007/BF00196178).
- Beauregard, L., Verma, M., Denker, C.: 2012, Horizontal Flows Concurrent with an X2.2 Flare in the Active Region NOAA 11158. *Astron. Nachr.* **333**, 125–130. doi:[10.1002/asna.201111631](https://doi.org/10.1002/asna.201111631).
- Bray, R.J., Loughhead, R.E.: 1964, *Sunspots*. **7**, Chapman Hall, London.
- Brickhouse, N.S., Labonte, B.J.: 1988, Mass and Energy Flow Near Sunspots. I. Observations of Moat Properties. *Solar Phys.* **115**, 43–60. doi:[10.1007/BF00146229](https://doi.org/10.1007/BF00146229).
- Deng, N., Choudhary, D.P., Tritschler, A., Denker, C., Liu, C., Wang, H.: 2007, Flow Field Evolution of a Decaying Sunspot. *Astrophys. J.* **671**, 1013–1021. doi:[10.1086/523102](https://doi.org/10.1086/523102).
- DeRosa, M., Slater, G.: 2013, *Guide to SDO DATA Analysis*. Lockheed Martin Solar & Astrophysics Laboratory, Palo Alto, California.
- Dick, W.R., Hamel, J. (eds.): 2002, *Beiträge zur Astronomiegeschichte (Band 2)*, *Acta Historica Astronomiae* **5**, Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Evershed, J.: 1909, Radial Movement in Sun-Spots. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **69**, 454–457.
- Grossmann-Doerth, U., Schmidt, W., Schroeter, E.H.: 1986, Size and Temperature of Umbral Dots. *Astron. Astrophys.* **156**, 347–353.
- Gurman, J.B.: 1992, Sunspots: A Laboratory for Solar Physics. In: Schmelz, J.T., Brown, J.C. (eds.) *The Sun: A Laboratory for Astrophysics*, *NATO Adv. Sci. Inst. Ser. C* **373**, 221–244.
- Hale, G.E.: 1908, On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots. *Astrophys. J.* **28**, 315. doi:[10.1086/141602](https://doi.org/10.1086/141602).
- Hale, G.E.: 1909, Recent Work of the Mount Wilson Solar Observatory. *Science* **29**, 220–222. doi:[10.1126/science.29.736.220](https://doi.org/10.1126/science.29.736.220).
- Hale, G.E.: 1912, A Sun-Spot Hypothesis. *Publ. Astron. Soc. Pac.* **24**, 226–228. doi:[10.1086/122166](https://doi.org/10.1086/122166).
- Hamel, J.: 1998, *Geschichte der Astronomie. Von den Anfängen bis zur Gegenwart*, Birkhäuser, Basel.
- Hanisch, R.J., Farris, A., Greisen, E.W., Pence, W.D., Schlesinger, B.M., Teuben, P.J., Thompson, R.W., Warnock, A.: 2001, Definition of the Flexible Image Transport System (FITS). *Astron. Astrophys.* **376**, 359–380.
- Hartung, J., Elpelt, B., Klösener, K.: 2005, *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen*, Oldenbourg, Oldenburg.
- Higgins, P.A., Gallagher, P.T., McAteer, R.T.J., Bloomfield, D.S.: 2011, Solar Magnetic Feature Detection and Tracking for Space Weather Monitoring. *Adv. Space Res.* **47**, 2105–2117. doi:[10.1016/j.asr.2010.06.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.024).



- Kaiser, M.L., Kucera, T.A., Davila, J.M., St. Cyr, O.C., Guhathakurta, M., Christian, E.: 2008, The STEREO Mission: An Introduction. *Space Sci Rev* **136**, 5 – 16. doi:[10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).
- Koutchmy, S., Le Piouffle, V.: 2009, Isolated Quasi-Axisymmetric Sunspots. In: Strassmeier, K.G., Kosovichev, A.G., Beckman, J.E. (eds.) *Cosmic Magnetic Fields: From Planets, to Stars and Galaxies*, IAU Symp. **259**, 227 – 228. doi:[10.1017/S174392130903049X](https://doi.org/10.1017/S174392130903049X).
- Künzel, H.: 1960, Die Flare-Häufigkeit in Fleckengruppen unterschiedlicher Klasse und magnetischer Struktur. *Astron. Nachr.* **285**, 271 – 273.
- Lang, K.R.: 2001, *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Leese, J.A., Novak, C.S., Taylor, V.R.: 1970, The Determination of Cloud Pattern Motions from Geosynchronous Satellite Image Data. *Pattern Recognit.* **2**, 279 – 280. doi:[10.1016/0031-3203\(70\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0031-3203(70)90018-X).
- Lemen, J.R., Title, A.M., Akin, D.J., Boerner, P.F., Chou, C., Drake, J.F., Duncan, D.W., Edwards, C.G., Friedlaender, F.M., Heyman, G.F., Hurlburt, N.E., Katz, N.L., Kushner, G.D., Levay, M., Lindgren, R.W., Mathur, D.P., McFeaters, E.L., Mitchell, S., Rehse, R.A., Schrijver, C.J., Springer, L.A., Stern, R.A., Tarbell, T.D., Wuelser, J.P., Wolfson, C.J., Yanari, C., Bookbinder, J.A., Cheimets, P.N., Caldwell, D., Deluca, E.E., Gates, R., Golub, L., Park, S., Podgorski, W.A., Bush, R.I., Scherrer, P.H., Gumm, M.A., Smith, P., Aufer, G., Jerram, P., Pool, P., Soufli, R., Windt, D.L., Beardsley, S., Clapp, M., Lang, J., Waltham, N.: 2012, The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* **275**, 17 – 40. doi:[10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Löhner-Böttcher, J., Schlichenmaier, R.: 2013, Correlations between Sunspots and their Moat Flows. *Astron. Astrophys.* **551**, A105. doi:[10.1051/0004-6361/201220543](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220543).
- Loughhead, R.E., Bray, R.J.: 1958, The Wilson Effect in Sunspots. *Aust. J. Phys.* **11**, 177 – 185. doi:[10.1071/PH580177](https://doi.org/10.1071/PH580177).
- McIntosh, P.S.: 1990, The Classification of Sunspot Groups. *Solar Phys.* **125**, 251 – 267. doi:[10.1007/BF00158405](https://doi.org/10.1007/BF00158405).
- Meyer, F., Schmidt, H.U., Simon, G.W., Weiss, N.O.: 1979, Buoyant Magnetic Flux Tubes in Supergranules. *Astron. Astrophys.* **76**, 35 – 45.
- Montesinos, B., Thomas, J.H.: 1997, The Evershed Effect in Sunspots as a Siphon Flow along a Magnetic Flux Tube. *Nature* **390**, 485 – 487. doi:[10.1038/37307](https://doi.org/10.1038/37307).
- Müller-Karpe, A., Müller-Karpe, V., Schrimpf, A.: 2009, Geometrie und Astronomie im Stadtplan des hethitischen Sarissa. *Mitt. Deutsch. Orient-Ges.* **141**, 45 – 64.
- November, L.J., Simon, G.W.: 1988, Precise Proper-Motion Measurement of Solar Granulation. *Astrophys. J.* **333**, 427 – 442. doi:[10.1086/166758](https://doi.org/10.1086/166758).
- Pesnell, W.D., Thompson, B.J., Chamberlin, P.C.: 2012, The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* **275**, 3 – 15. doi:[10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).
- Rieutord, M., Rincon, F.: 2010, The Sun's Supergranulation. *Living Reviews in Solar Physics* **7**, 2 – 83. doi:[10.12942/lrsp-2010-2](https://doi.org/10.12942/lrsp-2010-2).
- Schlichenmaier, R., Jahn, K., Schmidt, H.U.: 1998a, A Dynamical Model for the Penumbra Fine Structure and the Evershed Effect in Sunspots. *Astrophys. J. Lett.* **493**, L121 – L124. doi:[10.1086/311137](https://doi.org/10.1086/311137).
- Schlichenmaier, R., Jahn, K., Schmidt, H.U.: 1998b, Magnetic Flux Tubes Evolving in Sunspots. A Model for the Penumbra Fine Structure and the Evershed Flow. *Astron. Astrophys.* **337**, 897 – 910.

- Schmidt, W., von der Lühe, O., Volkmer, R., Denker, C., Solanki, S.K., Balthasar, H., Bello Gonzalez, N., Berkefeld, T., Collados, M., Fischer, A., Halbgehwachs, C., Heidecke, F., Hofmann, A., Kneer, F., Lagg, A., Nicklas, H., Popow, E., Puschmann, K.G., Schmidt, D., Sigwarth, M., Sobotka, M., Soltau, D., Staude, J., Strassmeier, K.G., Waldmann, T.A.: 2012, The 1.5 meter Solar Telescope GREGOR. *Astro. Nachr.* **333**, 796. doi:[10.1002/asna.201211725](https://doi.org/10.1002/asna.201211725).
- Schou, J., Scherrer, P.H., Bush, R.I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M.C., Bogart, R.S., Hoeksema, J.T., Liu, Y., Duvall, T.L., Akin, D.J., Allard, B.A., Miles, J.W., Rairden, R., Shine, R.A., Tarbell, T.D., Title, A.M., Wolfson, C.J., Elmore, D.F., Norton, A.A., Tomczyk, S.: 2012, Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* **275**, 229–259. doi:[10.1007/s11207-011-9842-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2).
- Schuck, P.W.: 2006, Tracking Magnetic Footpoints with the Magnetic Induction Equation. *Astrophys. J.* **646**, 1358–1391. doi:[10.1086/505015](https://doi.org/10.1086/505015).
- Schwabe, M.: 1843, Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe. *Astron. Nachr.* **20**, 283–286. doi:[10.1002/asna.18430201706](https://doi.org/10.1002/asna.18430201706).
- Sheeley, N.R. Jr.: 1969, The Evolution of the Photospheric Network. *Solar Phys.* **9**, 347–357. doi:[10.1007/BF02391657](https://doi.org/10.1007/BF02391657).
- Sheeley, N.R. Jr.: 1972, Observations of the Horizontal Velocity Field Surrounding Sunspots. *Solar Phys.* **25**, 98–103. doi:[10.1007/BF00155747](https://doi.org/10.1007/BF00155747).
- Sobotka, M., Roudier, T.: 2007, Properties of Sunspot Moats Derived from Horizontal Motions. *Astron. Astrophys.* **472**, 277–282. doi:[10.1051/0004-6361:20077552](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077552).
- Sobotka, M., Bonet, J.A., Vazquez, M.: 1993, A High-Resolution Study of Inhomogeneities in Sunspot Umbrae. *Astrophys. J.* **415**, 832. doi:[10.1086/173205](https://doi.org/10.1086/173205).
- Solanki, S.K.: 2003, Sunspots: An Overview. *Astron. Astrophys.* **11**, 153–286. doi:[10.1007/s00159-003-0018-4](https://doi.org/10.1007/s00159-003-0018-4).
- Spiegel, E.A., Zahn, J.P.: 1992, The Solar Tachocline. *Astron. Astrophys.* **265**, 106–114.
- Stix, M.: 2004, *The Sun: And Introduction, Astronomy and Astrophysics Library*, Springer, Heidelberg.
- Unsöld, A., Baschek, B.: 1988, *Der neue Kosmos*, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- van der Waerden, B.L.: 1988, *Die Astronomie der Griechen, Wissenschaftliche Buchgesellschaft*, Springer, Darmstadt.
- Verma, M., Denker, C.: 2011, Horizontal Flow Fields Observed in Hinode G-Band Images. I. Methods. *Astron. Astrophys.* **529**, A153. doi:[10.1051/0004-6361/201016358](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016358).
- Verma, M., Balthasar, H., Deng, N., Liu, C., Shimizu, T., Wang, H., Denker, C.: 2012, Horizontal Flow Fields observed in Hinode G-band Images. II. Flow Fields in the Final Stages of Sunspot Decay. *Astron. Astrophys.* **538**, A109. doi:[10.1051/0004-6361/201117842](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117842).
- Wang, S., Liu, C., Wang, H.: 2010, Study of Sunspot Motion and Flow Fields associated with Solar Flares. In: *The Physics of Sun and Star Spots, Proc. IAU* **6**, 412–416. doi:[10.1017/S1743921311015663](https://doi.org/10.1017/S1743921311015663).
- Weigert, A., Wendker, H., Wisotzki, L.: 2012, *Astronomie und Astrophysik: Ein Grundkurs*, Wiley, Weinheim.
- Wilson, A.: 1769, Observations of the Transit of Venus Over the Sun, Contained in a Letter to the Reverend Nevil Maskelyne, Astronomer Royal, from Dr. Alexander Wilson, Professor of Astronomy in the University of Glasgow. *RSTL Series I* **59**, 333–338.

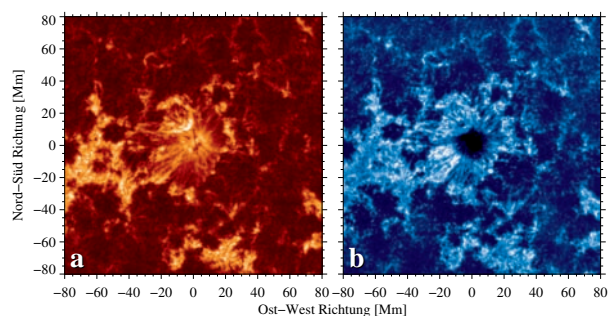
- Woods, T.N., Eparvier, F.G., Hock, R., Jones, A.R., Woodraska, D., Judge, D., Didkovsky, L., Lean, J., Mariska, J., Warren, H., McMullin, D., Chamberlin, P., Berthiaume, G., Bailey, S., Fuller-Rowell, T., Sojka, J., Tobiska, W.K., Viereck, R.: 2012, Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments. *Solar Phys.* **275**, 115 – 143. doi:[10.1007/s11207-009-9487-6](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9487-6).
- Zhao, J., Kosovichev, A.G., Sekii, T.: 2010, High-Resolution Helioseismic Imaging of Subsurface Structures and Flows of a Solar Active Region Observed by Hinode. *Astrophys. J.* **708**, 304 – 313. doi:[10.1088/0004-637X/708/1/304](https://doi.org/10.1088/0004-637X/708/1/304).
- Zirin, H.: 1992, Solar Activity. In: Schmelz, J.T., Brown, J.C. (eds.) *The Sun: A Laboratory for Astrophysics*, *NATO Adv. Sci. Inst. Ser. C* **373**, 449 – 463.

## Appendix A – Übersicht aller Sonnenflecken

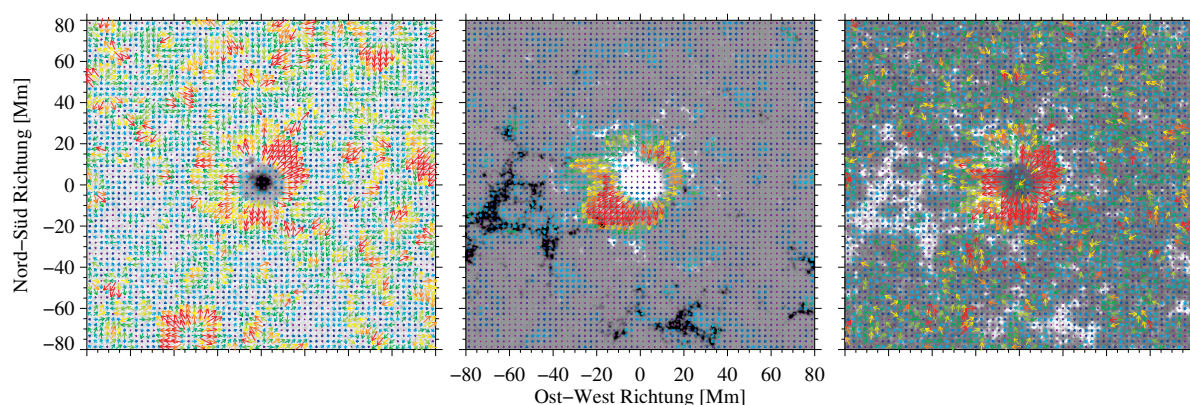
In diesem Teil wird jeder Sonnenfleck der Arbeit mit dem zugehörigen Daten aufgelistet. Diese Daten umfassen, Datum und der Zeitpunkt der Meridian Passage, Fleckentyp, Ausdehnung und Breitengrad. Zusätzlich beinhaltet das jeweilige Datenblatt noch die hintergrundsubtrahierte Variation der magnetischen Flussdichte (a) und der  $\lambda 160$  nm Intensität (b). Desweiteren ist die Darstellung der horizontalen Bewegungen mittels LCT und DAVE enthalten. Ebenfalls dargestellt in Abhängigkeit vom Abstand vom Kernzentrum sind die radiale Intensität, magnetische Flussdichte  $B$ , horizontale Flussgeschwindigkeit  $v$ , die radiale Komponente der Flussgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v = \partial v_x / \partial x + \partial v_y / \partial y$ .

## Aktive Region 11658

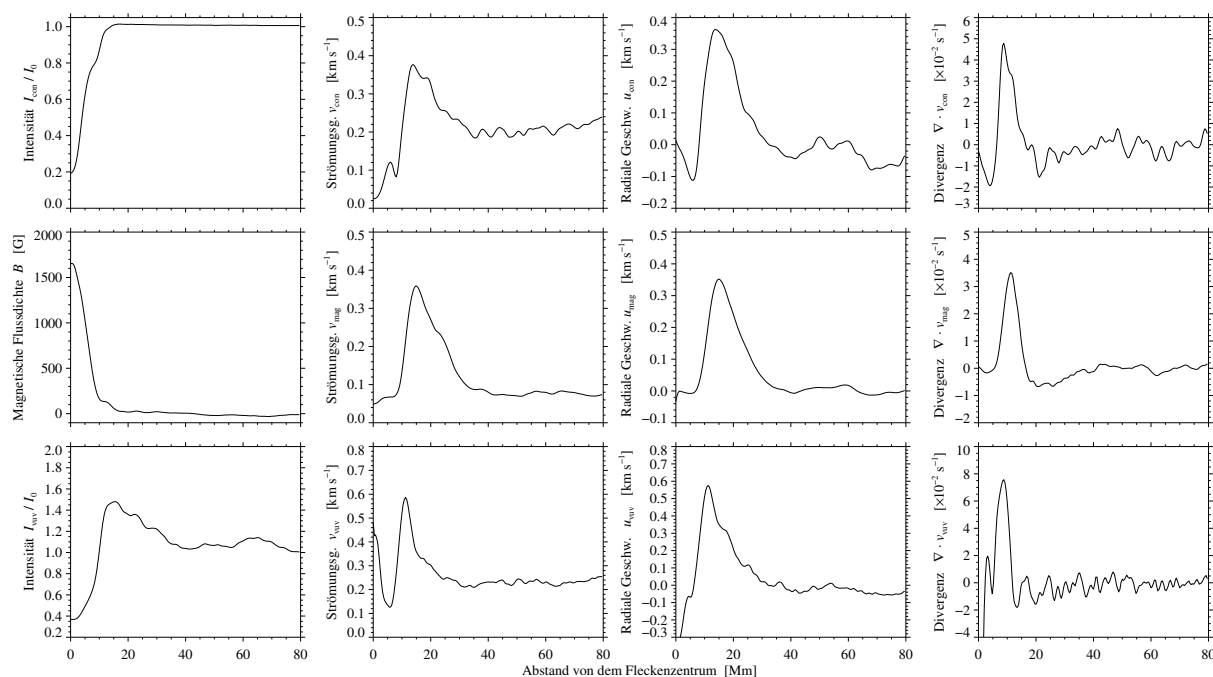
Datum	2013-01-18
Meridian Passage	21:09 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2195,1 Mm <sup>2</sup> / 26,4 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	452,1 Mm <sup>2</sup> / 12,0 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	365,8 Mm <sup>2</sup> / 10,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	66,1 Mm <sup>2</sup> / 4,6 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma$
Breitengrad	S13



**Abbildung 6.1:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$ .



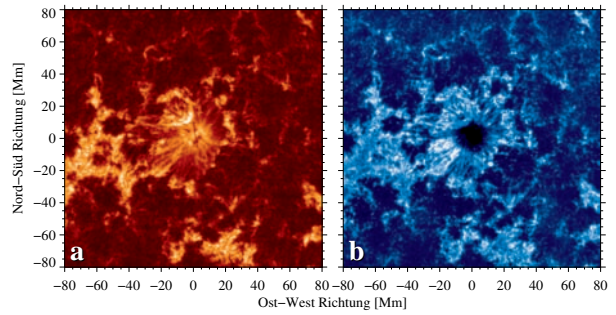
**Abbildung 6.2:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11658. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



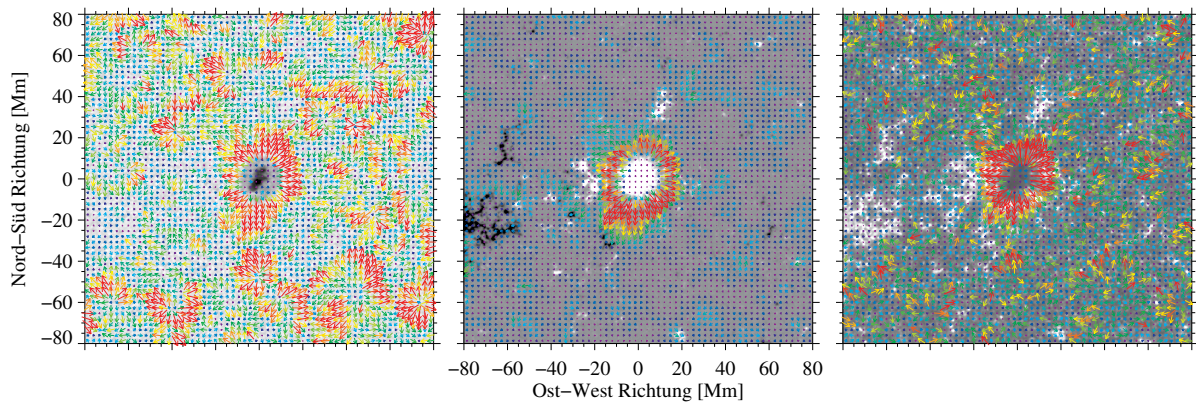
**Abbildung 6.3:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11663

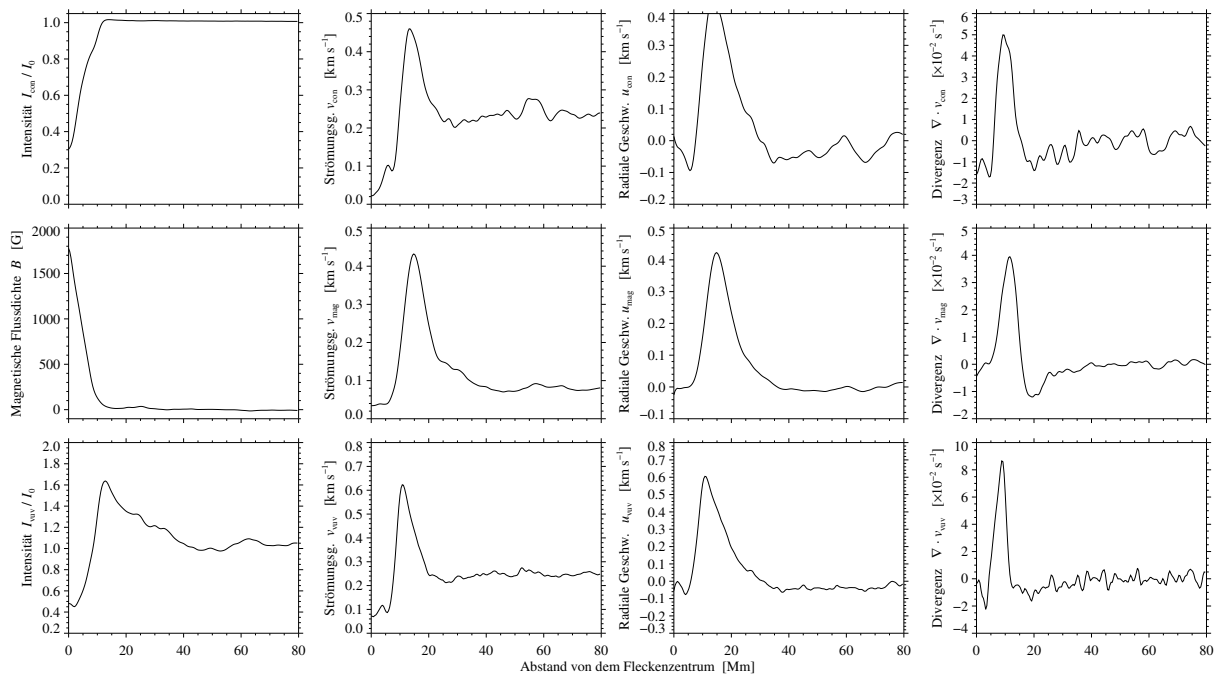
Datum	2013-01-30
Meridian Passage	03:53 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1923,8 Mm <sup>2</sup> / 24,7 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	347,8 Mm <sup>2</sup> / 10,5 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	304,6 Mm <sup>2</sup> / 9,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	50,6 Mm <sup>2</sup> / 4,0 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S11



**Abbildung 6.4:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.5:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11663. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 6.6:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

# Aktive Region 11671

Datum	2013-02-16
Meridian Passage	12:15 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1506,8 Mm <sup>2</sup> / 21,9 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	441,1 Mm <sup>2</sup> / 11,8 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	451,8 Mm <sup>2</sup> / 12,0 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	80,8 Mm <sup>2</sup> / 5,1 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma$
Breitengrad	N14

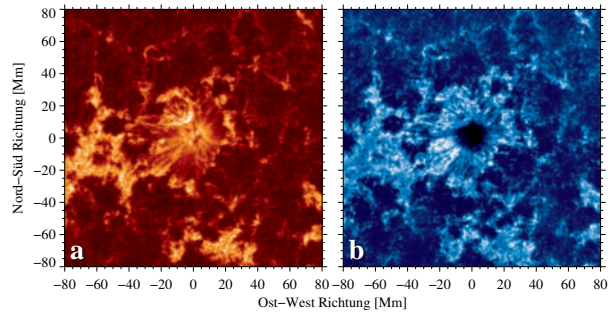


Abbildung 6.7: Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$

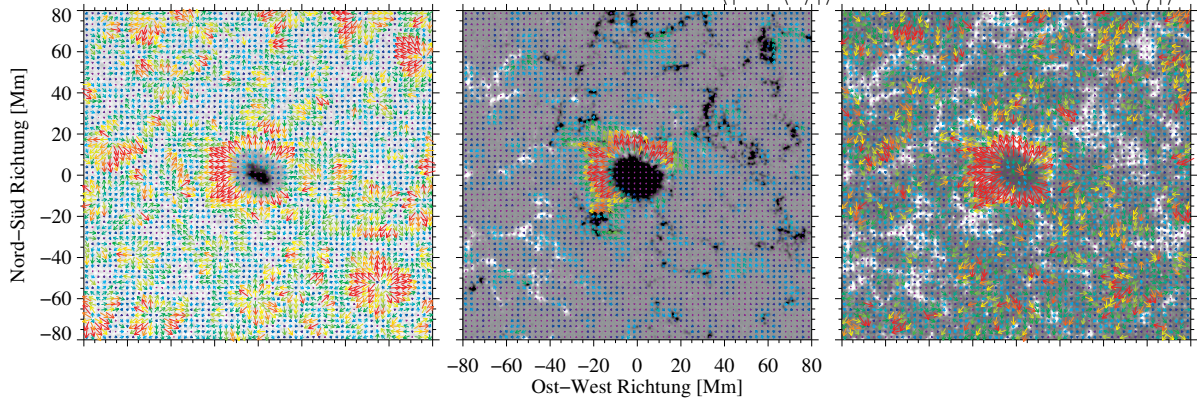


Abbildung 6.8: Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11676. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

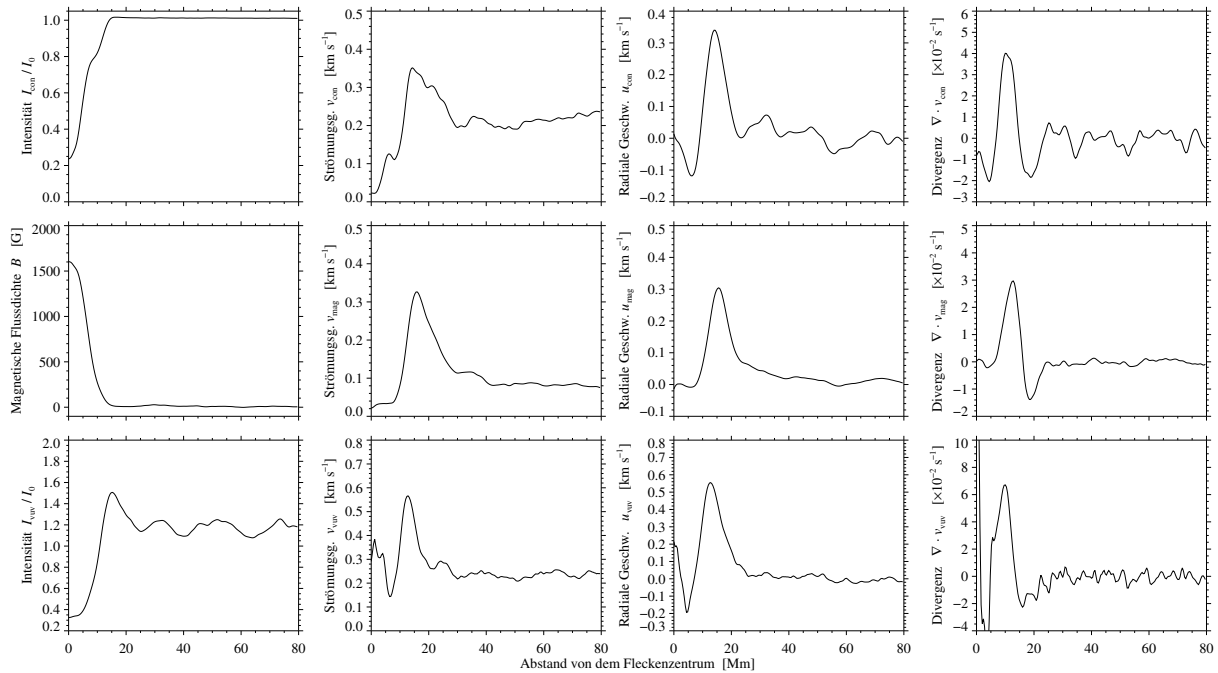
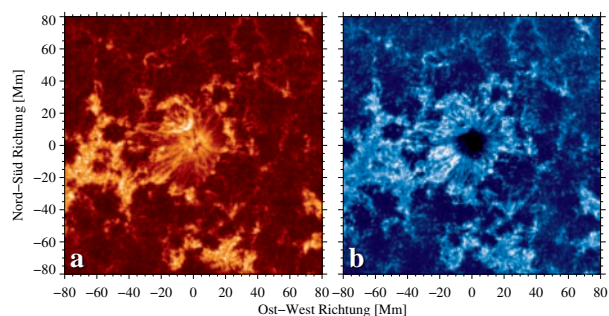


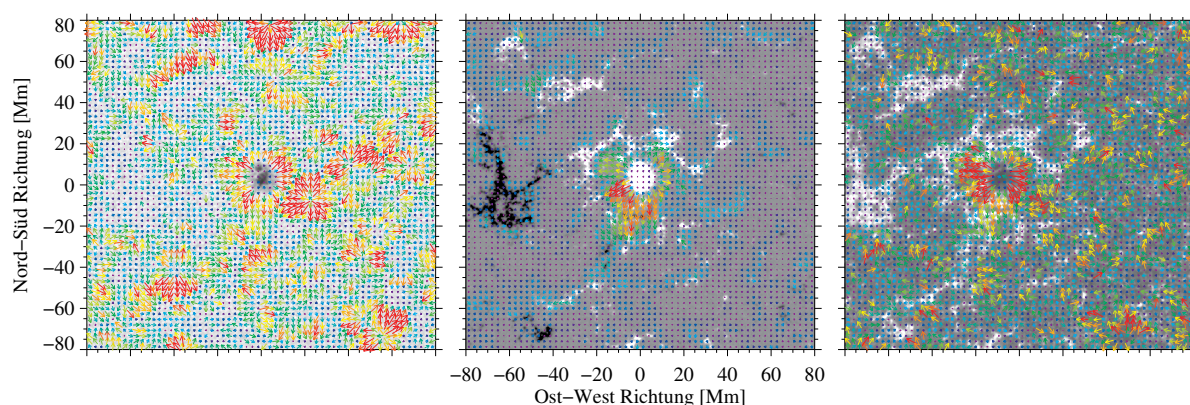
Abbildung 6.9: Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11676

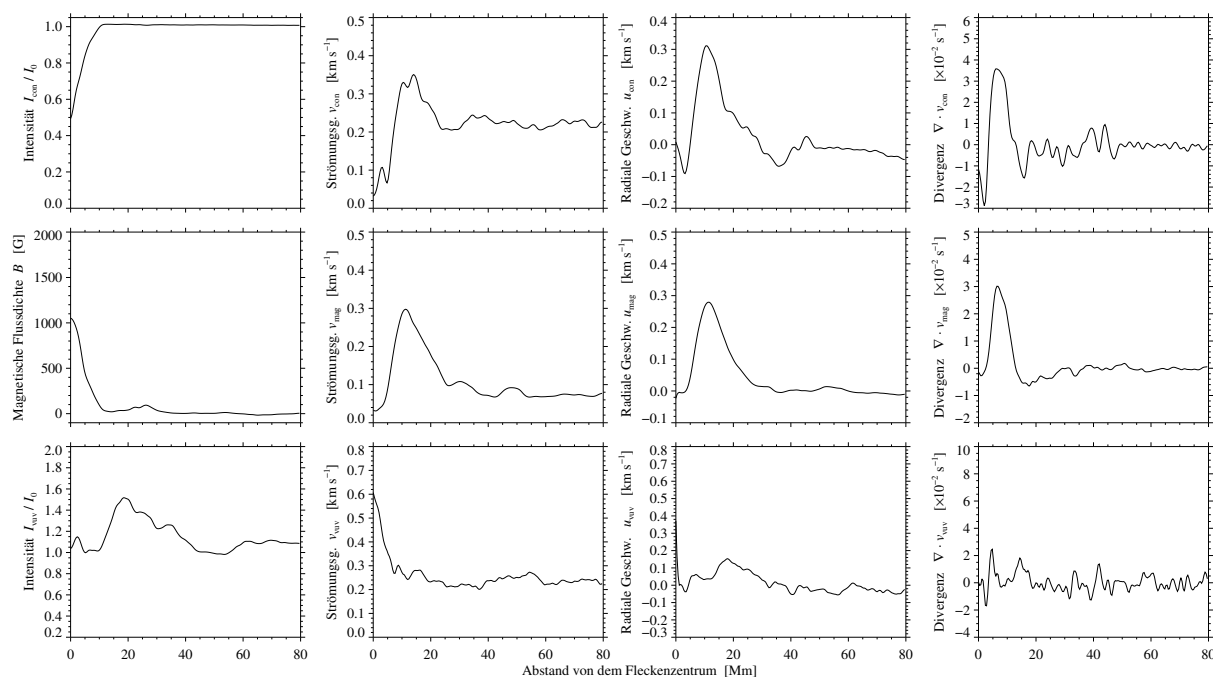
Datum	2013-02-22
Meridian Passage	04:22 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1233,0 Mm <sup>2</sup> / 19,8 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	209,7 Mm <sup>2</sup> / 8,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	140,8 Mm <sup>2</sup> / 6,7 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	20,1 Mm <sup>2</sup> / 2,5 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma\delta$
Breitengrad	S19



**Abbildung 6.10:** Hintergrundsabtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.11:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11676. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

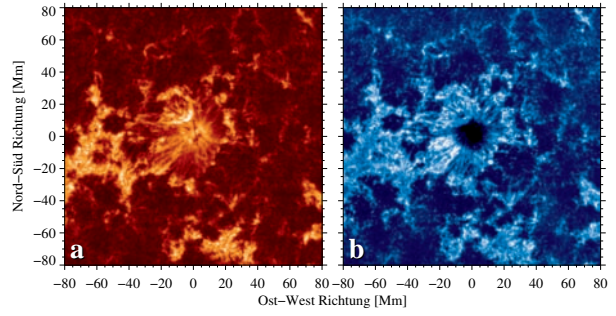


**Abbildung 6.12:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

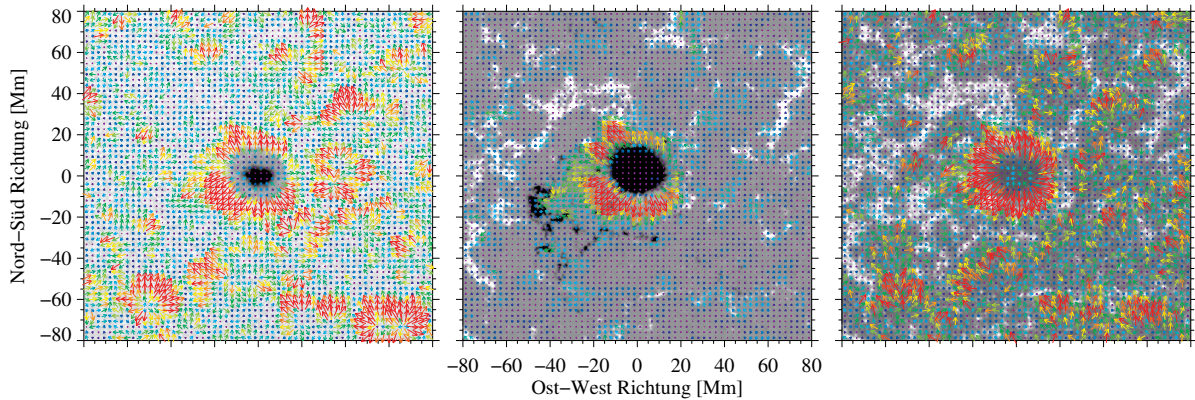


## Aktive Region 11777

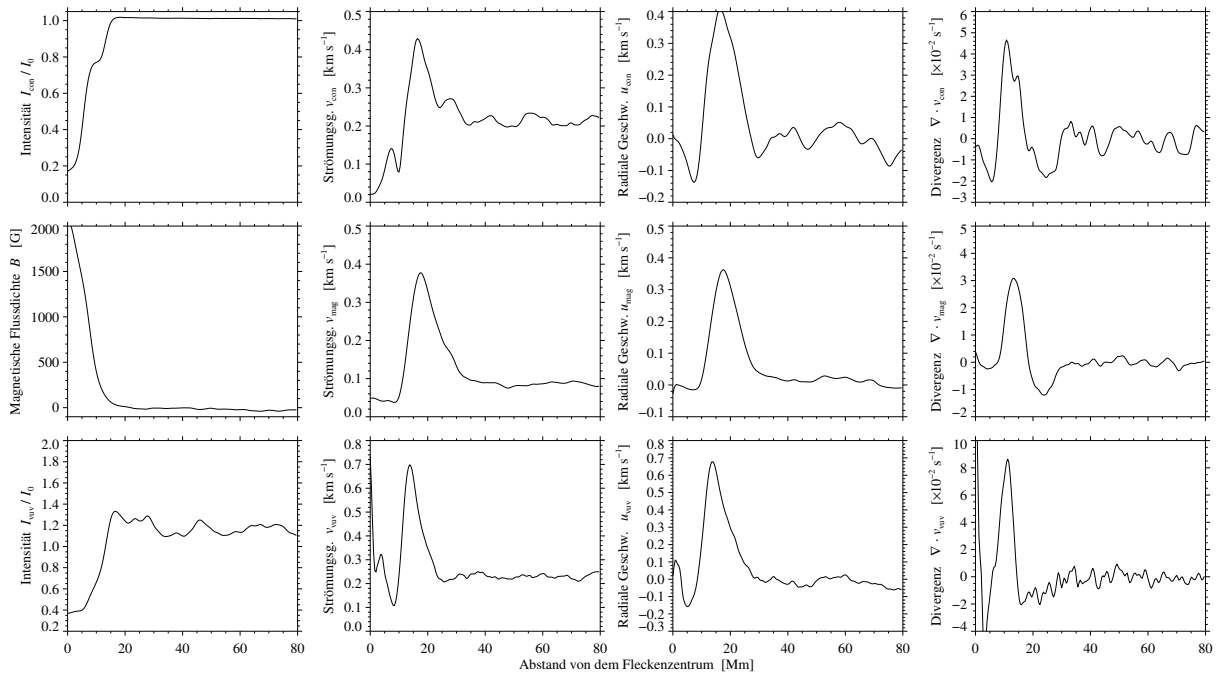
Datum	2013-06-26
Meridian Passage	05:35 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2394,4 Mm <sup>2</sup> / 27,6 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	560,5 Mm <sup>2</sup> / 13,4 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	577,0 Mm <sup>2</sup> / 13,6 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	119,8 Mm <sup>2</sup> / 6,2 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma$
Breitengrad	S16



**Abbildung 6.13:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



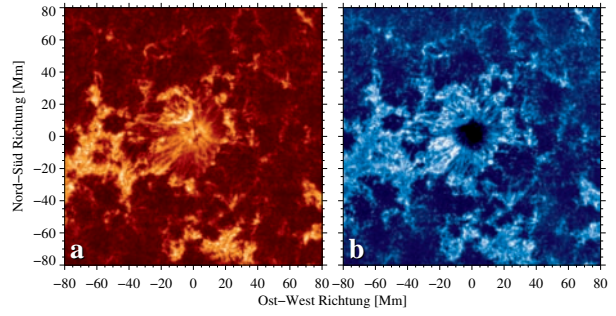
**Abbildung 6.14:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11777. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



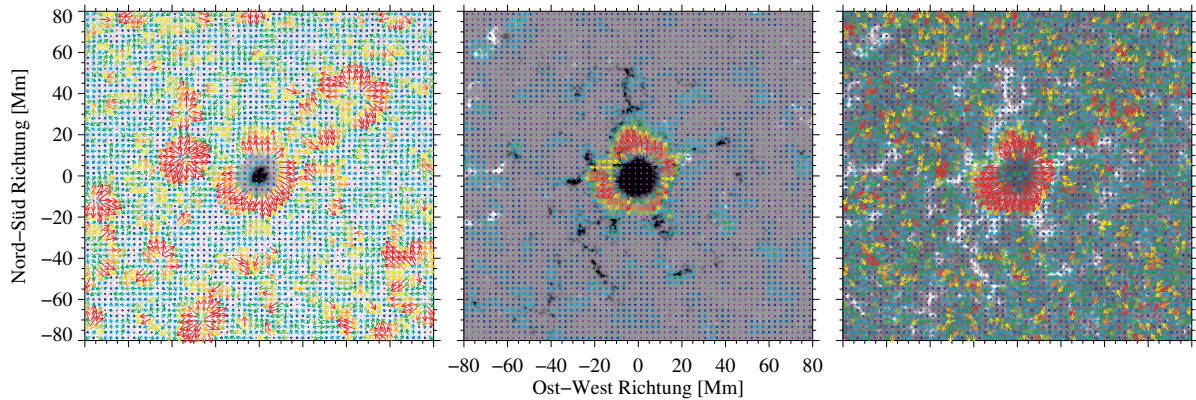
**Abbildung 6.15:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11801

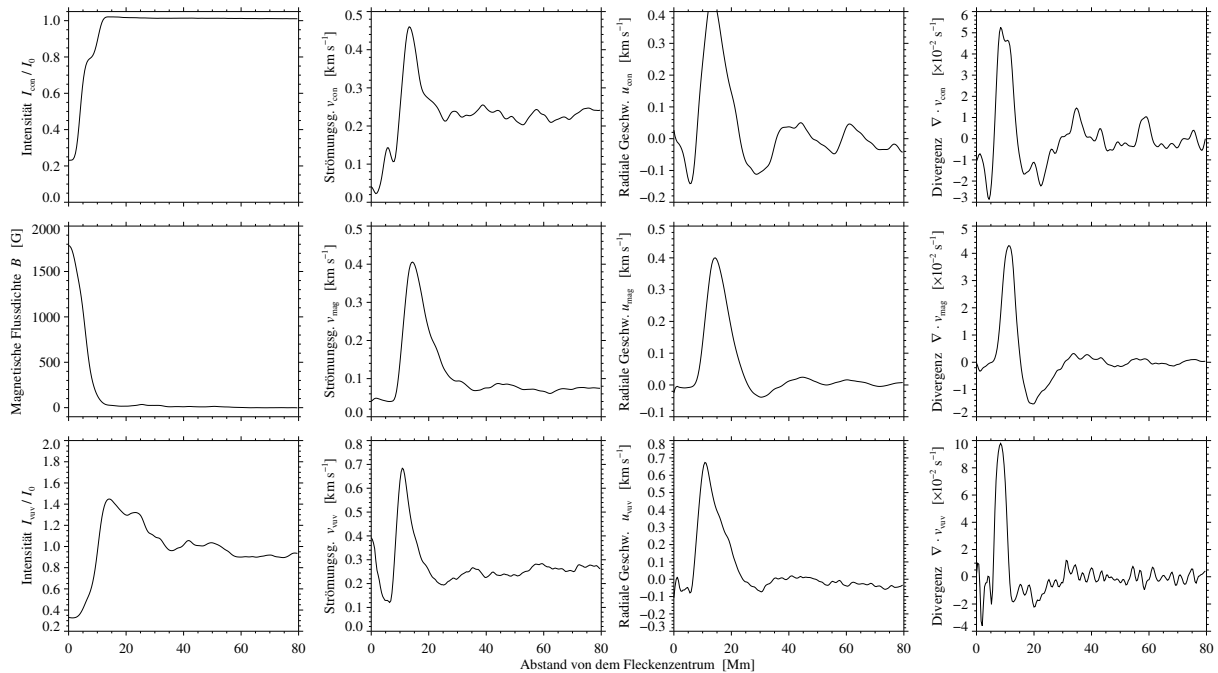
Datum	2013-07-29
Meridian Passage	12:01 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1490,9 Mm <sup>2</sup> / 21,8 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	340,2 Mm <sup>2</sup> / 10,4 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	329,4 Mm <sup>2</sup> / 10,2 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	60,4 Mm <sup>2</sup> / 4,4 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma\delta$
Breitengrad	N19



**Abbildung 6.16:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



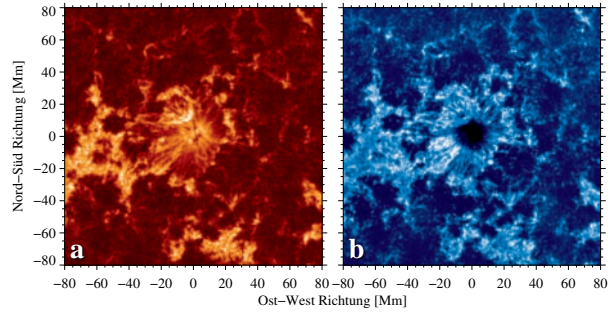
**Abbildung 6.17:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11801. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



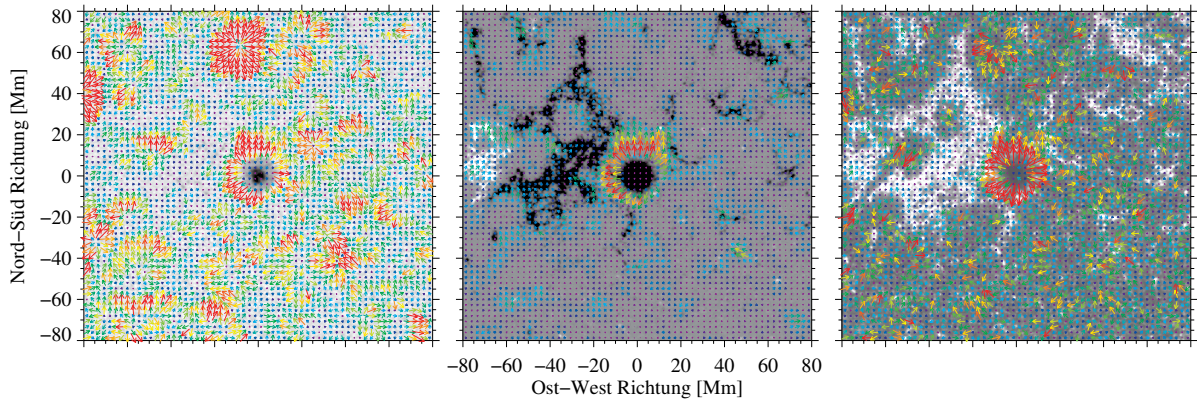
**Abbildung 6.18:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

# Aktive Region 11809

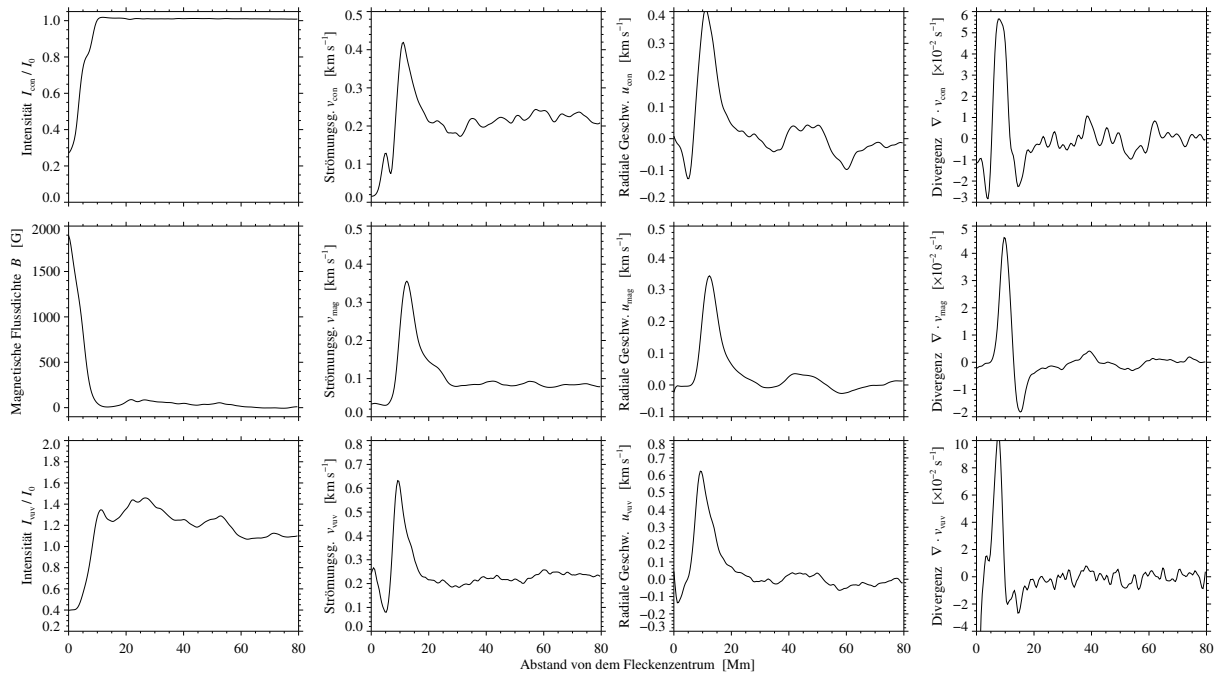
Datum	2013-08-06
Meridian Passage	23:13 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1102,2 Mm <sup>2</sup> / 18,7 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	241,4 Mm <sup>2</sup> / 8,8 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	216,2 Mm <sup>2</sup> / 8,3 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	41,1 Mm <sup>2</sup> / 3,6 Mm
Fleckentyp	$\beta$
Breitengrad	N12



**Abbildung 6.19:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



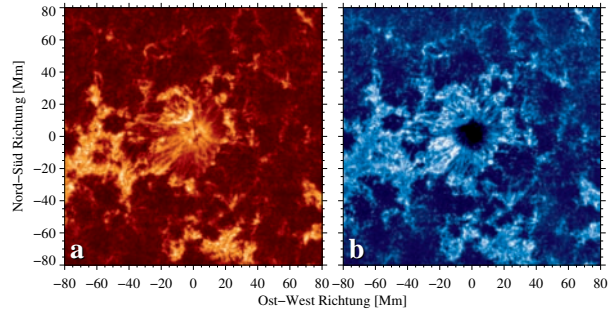
**Abbildung 6.20:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11809. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



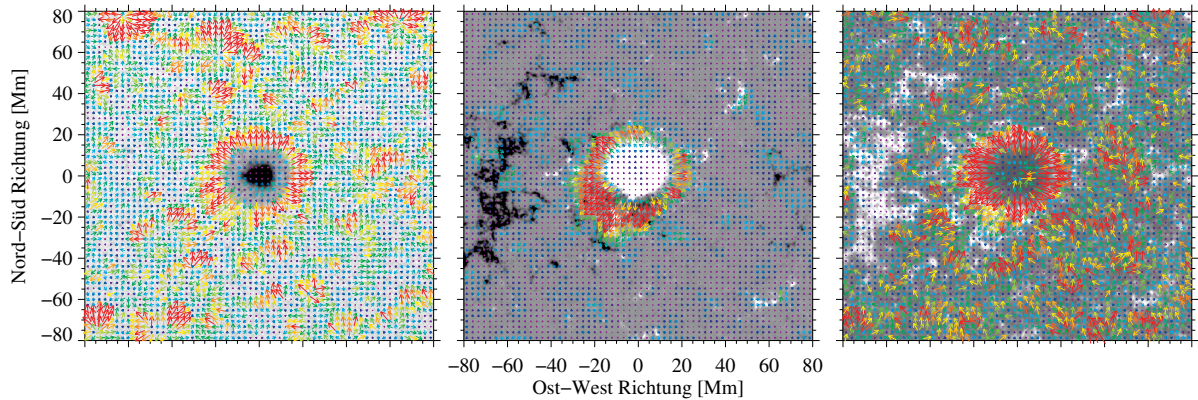
**Abbildung 6.21:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11846

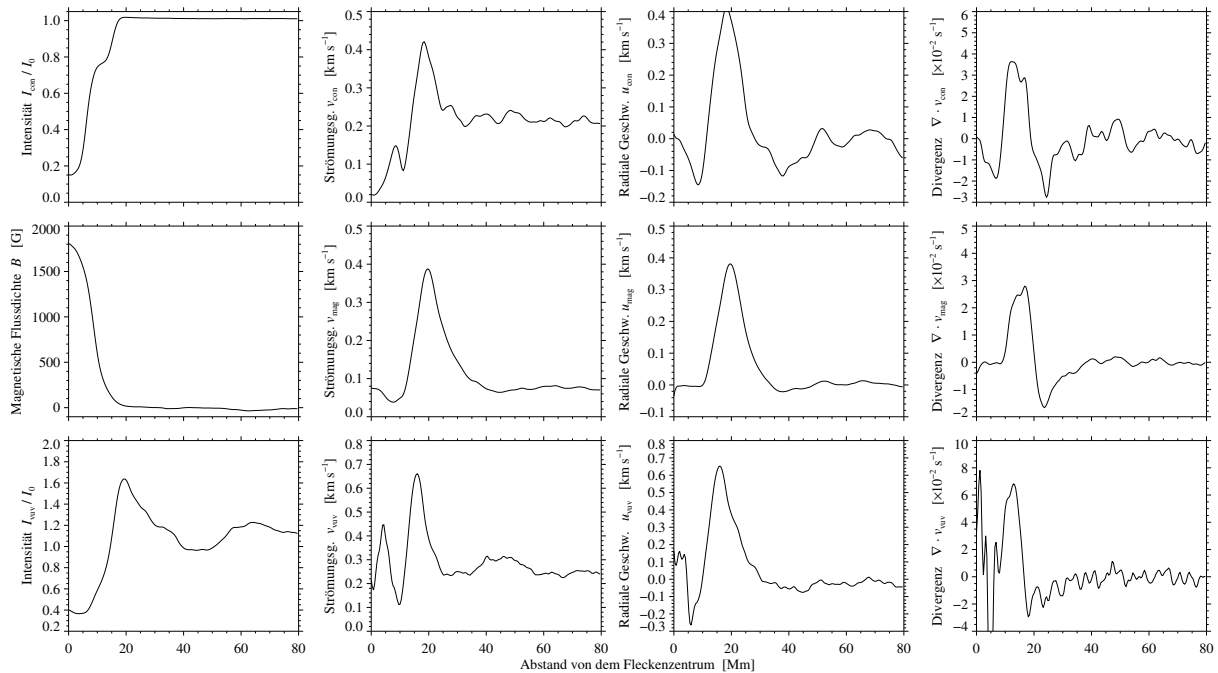
Datum	2013-09-23
Meridian Passage	23:13 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2352,4 Mm <sup>2</sup> / 27,4 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	716,3 Mm <sup>2</sup> / 15,1 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	754,9 Mm <sup>2</sup> / 15,5 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	161,7 Mm <sup>2</sup> / 7,2 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N06



**Abbildung 6.22:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



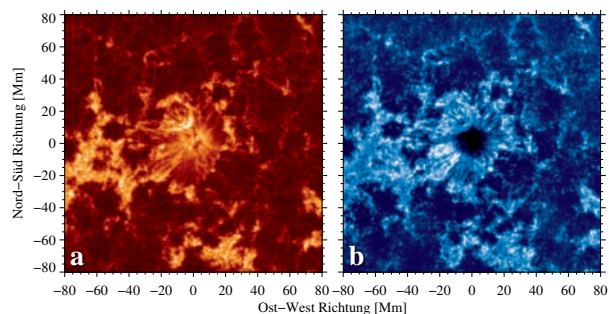
**Abbildung 6.23:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11846. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



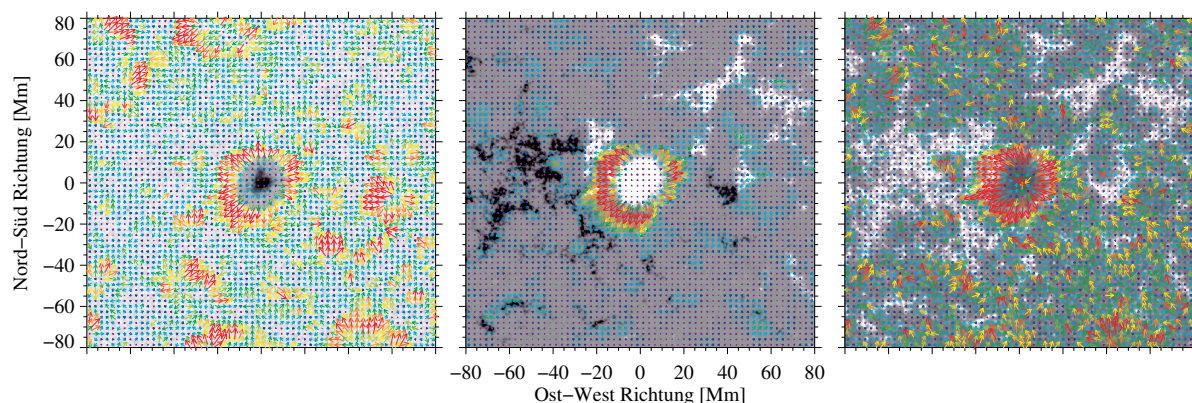
**Abbildung 6.24:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11857

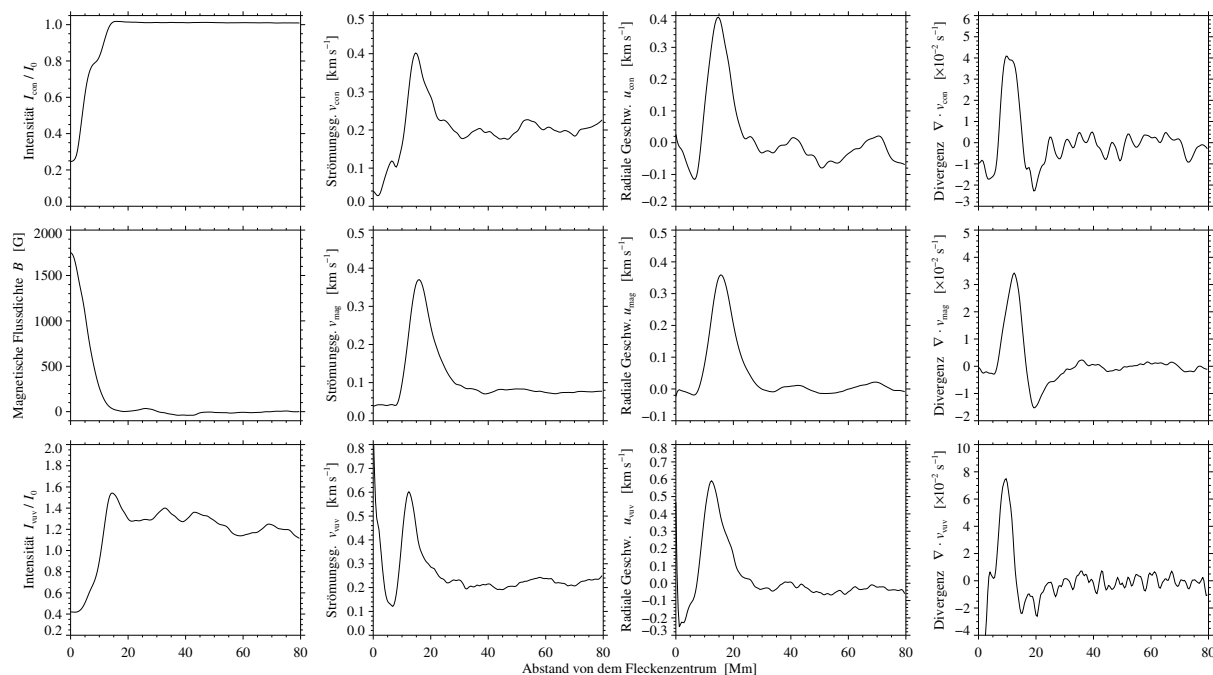
Datum	2013-10-08
Meridian Passage	05:02 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1579,4 Mm <sup>2</sup> / 22,4 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	457,4 Mm <sup>2</sup> / 12,1 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	436,8 Mm <sup>2</sup> / 11,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	69,7 Mm <sup>2</sup> / 4,7 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S13



**Abbildung 6.25:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



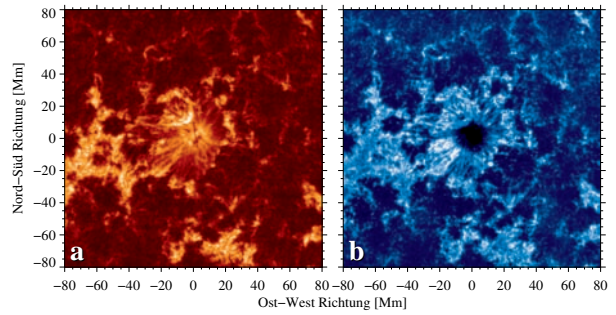
**Abbildung 6.26:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11857. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



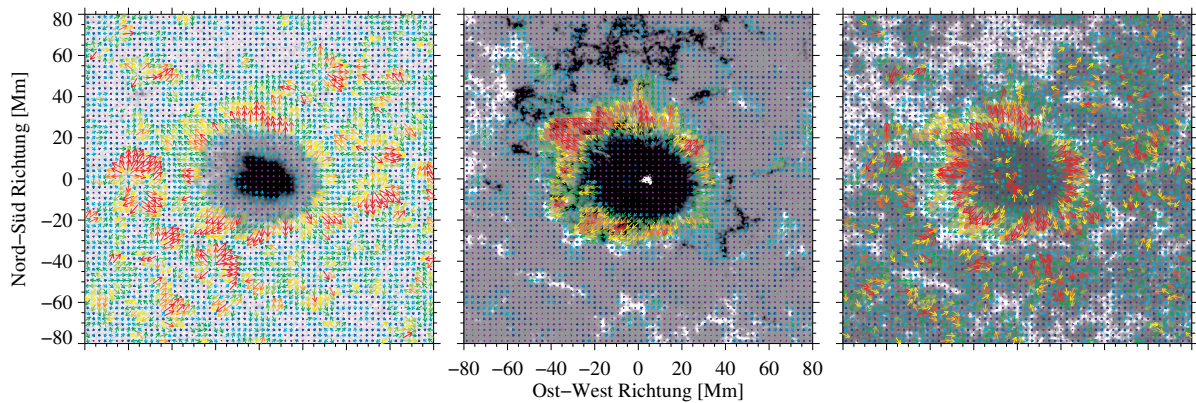
**Abbildung 6.27:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11899

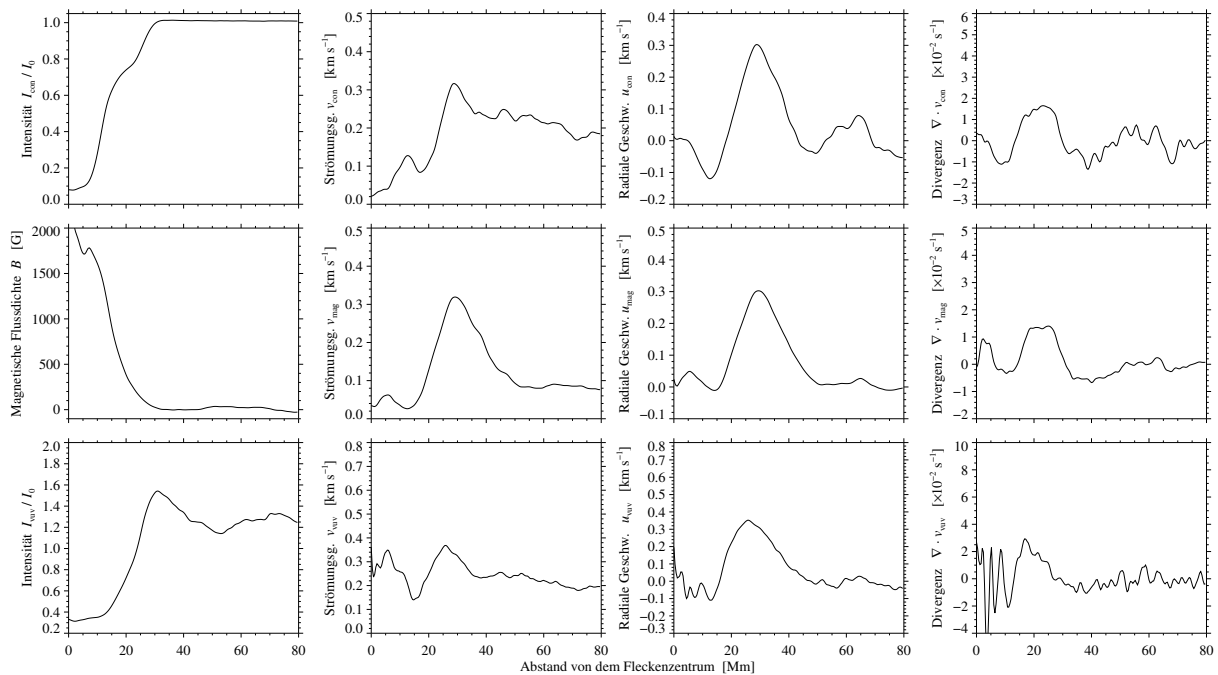
Datum	2013-11-18
Meridian Passage	15:44 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	5218 $\text{Mm}^2$ / 40,8 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	2220 $\text{Mm}^2$ / 26,6 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	2264 $\text{Mm}^2$ / 26,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	585 $\text{Mm}^2$ / 13,7 Mm
Fleckentyp	$\alpha\gamma$
Breitengrad	N06



**Abbildung 6.28:** Hintergrundsabtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



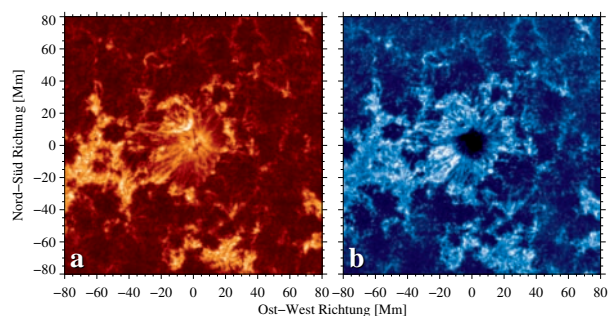
**Abbildung 6.29:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11899. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



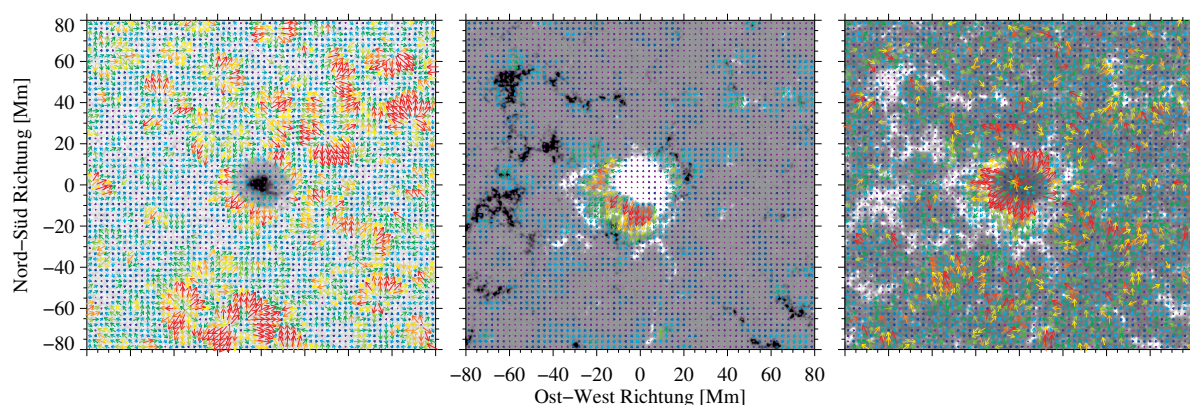
**Abbildung 6.30:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11903

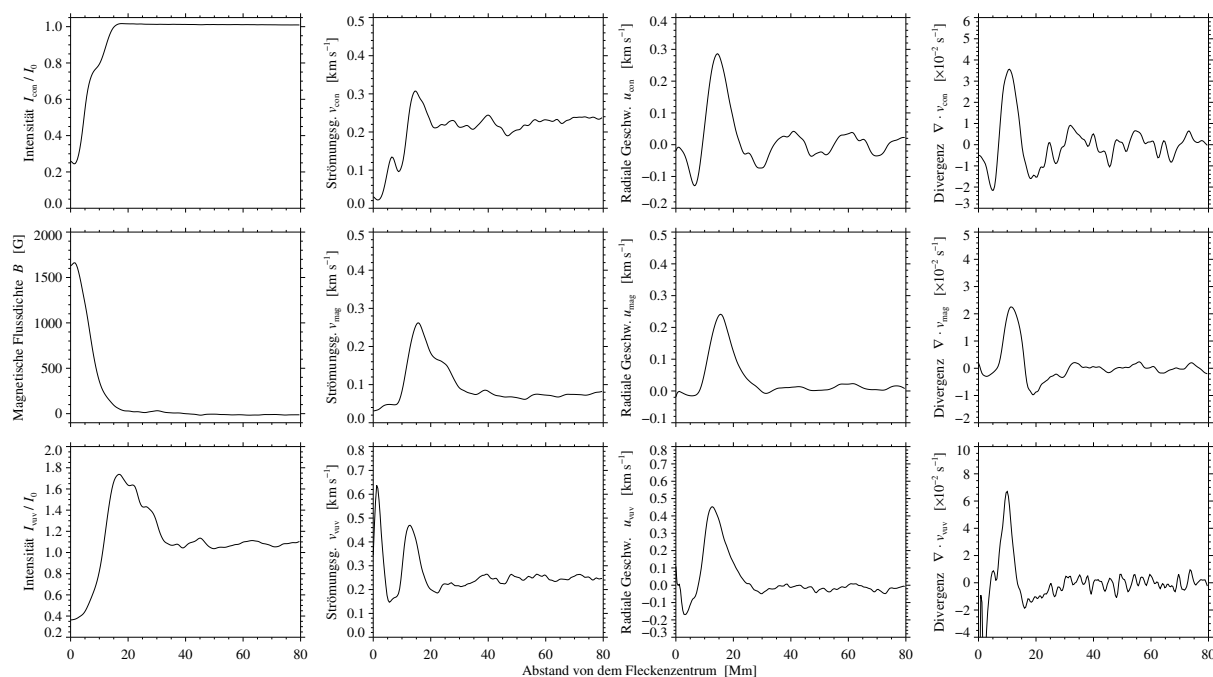
Datum	2013-11-23
Meridian Passage	17:20 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1143,0 Mm <sup>2</sup> / 19,1 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	716,9 Mm <sup>2</sup> / 15,1 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	514,2 Mm <sup>2</sup> / 12,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	88,1 Mm <sup>2</sup> / 5,3 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S12



**Abbildung 6.31:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



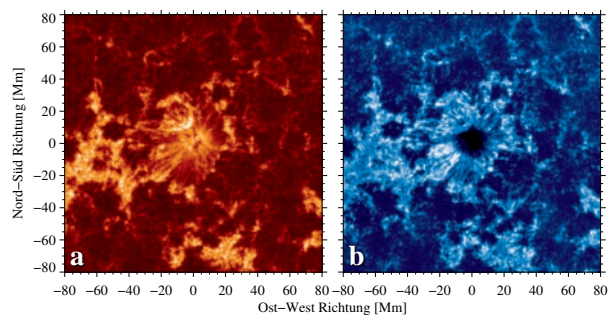
**Abbildung 6.32:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11903. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



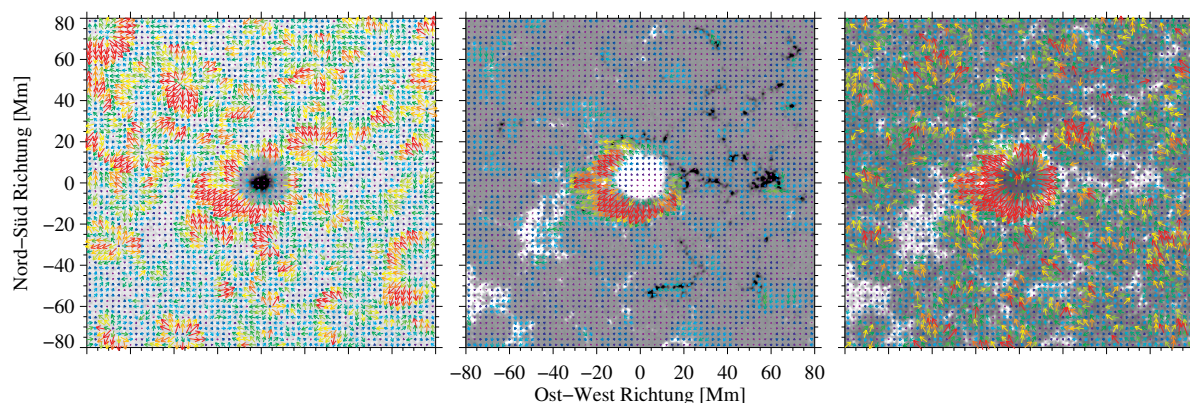
**Abbildung 6.33:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11912

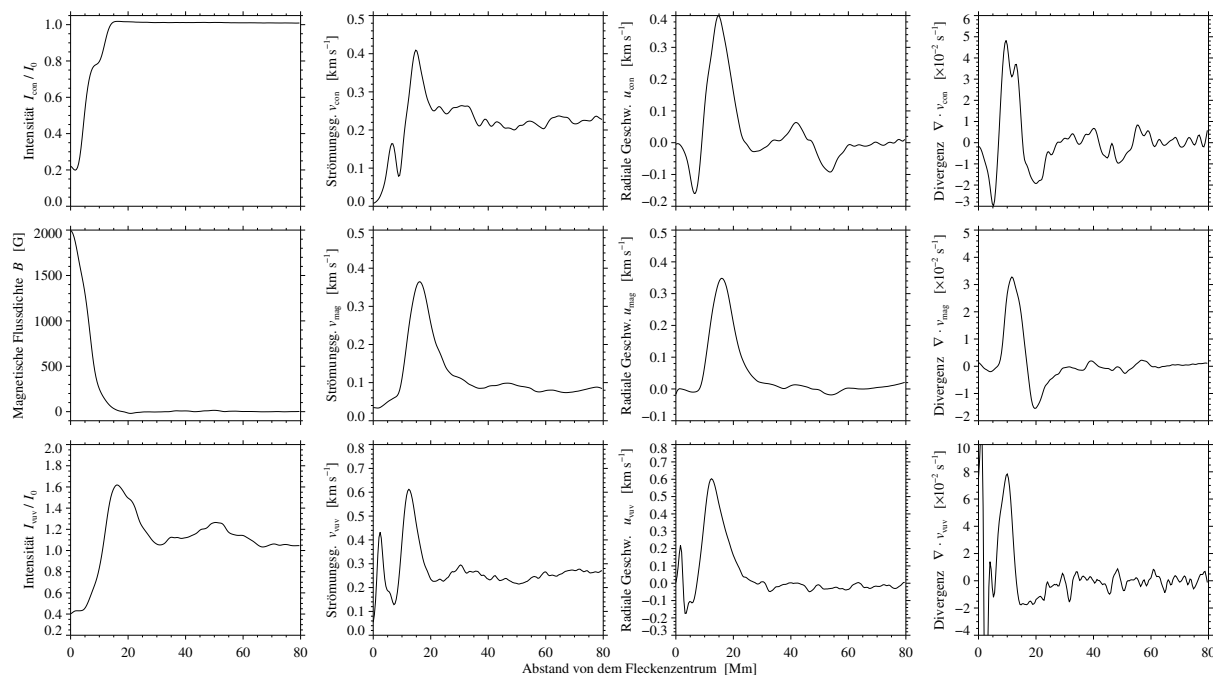
Datum	2013-12-08
Meridian Passage	02:26 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1395,3 Mm <sup>2</sup> / 21,1 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	469,0 Mm <sup>2</sup> / 12,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	460,2 Mm <sup>2</sup> / 12,1 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	86,3 Mm <sup>2</sup> / 5,2 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S21



**Abbildung 6.34:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.35:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11912. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

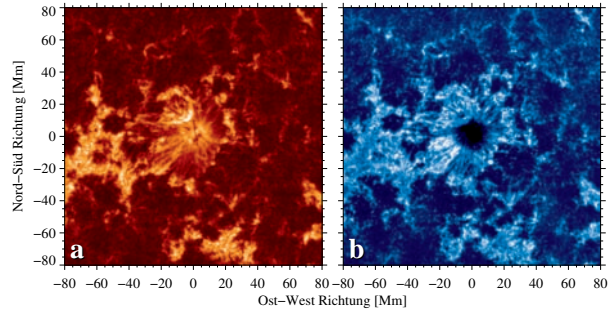


**Abbildung 6.36:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

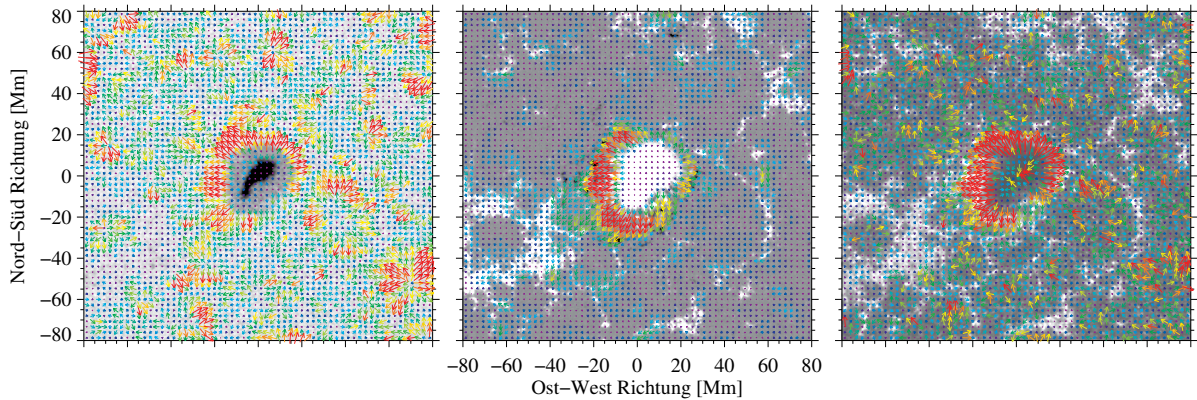


# Aktive Region 11931

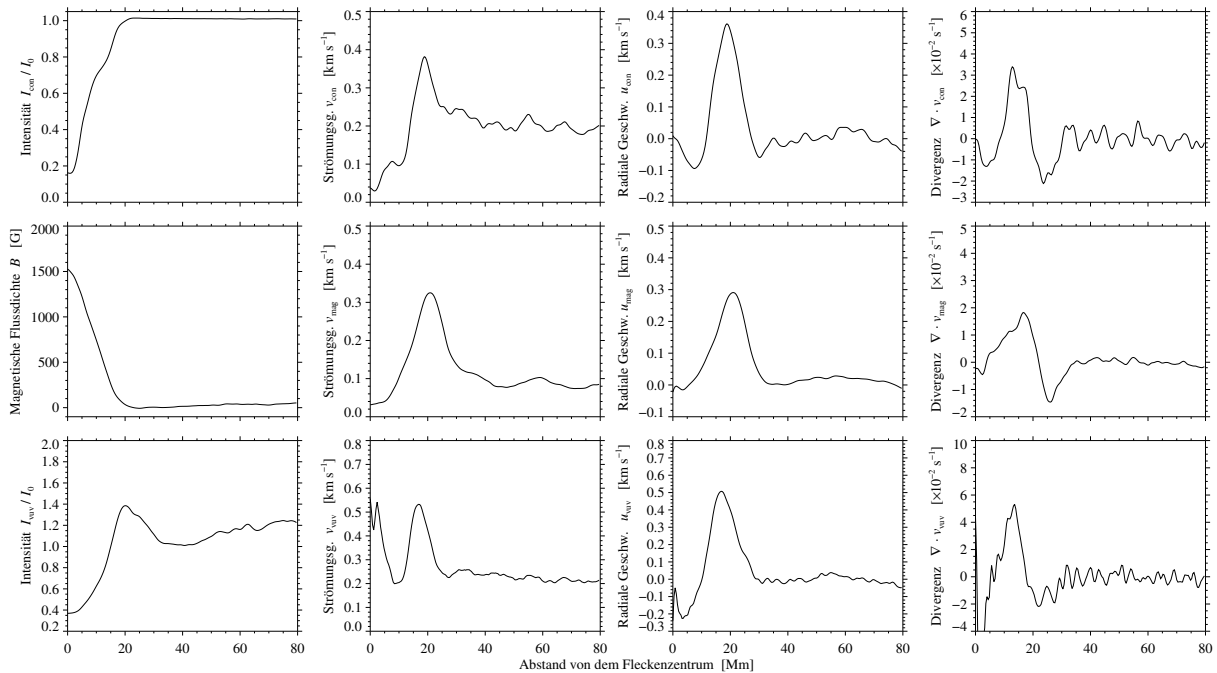
Datum	2013-12-24
Meridian Passage	15:25 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2227,9 Mm <sup>2</sup> / 26,6 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	838,0 Mm <sup>2</sup> / 16,3 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	866,2 Mm <sup>2</sup> / 16,6 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	166, Mm <sup>2</sup> / 7,3 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S14



**Abbildung 6.37:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



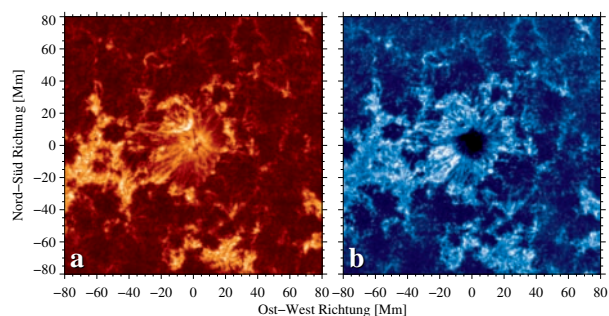
**Abbildung 6.38:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11931. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



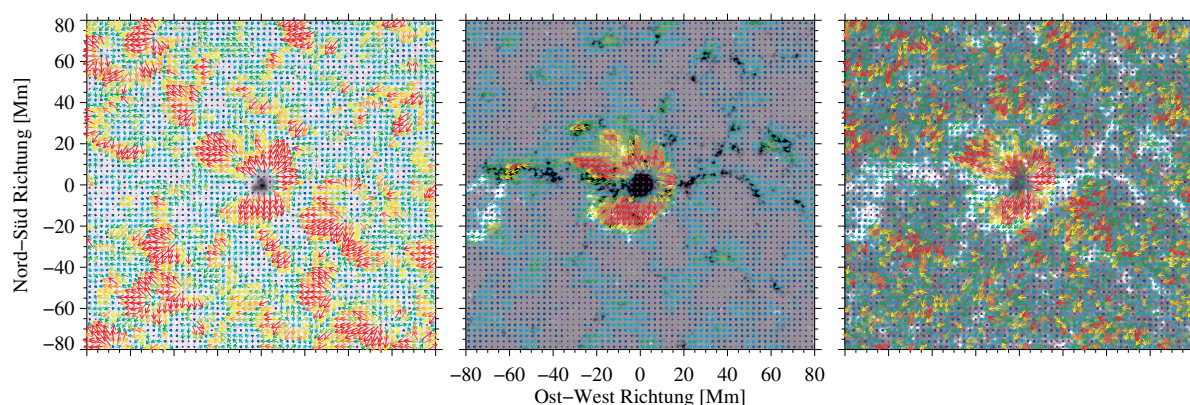
**Abbildung 6.39:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11942

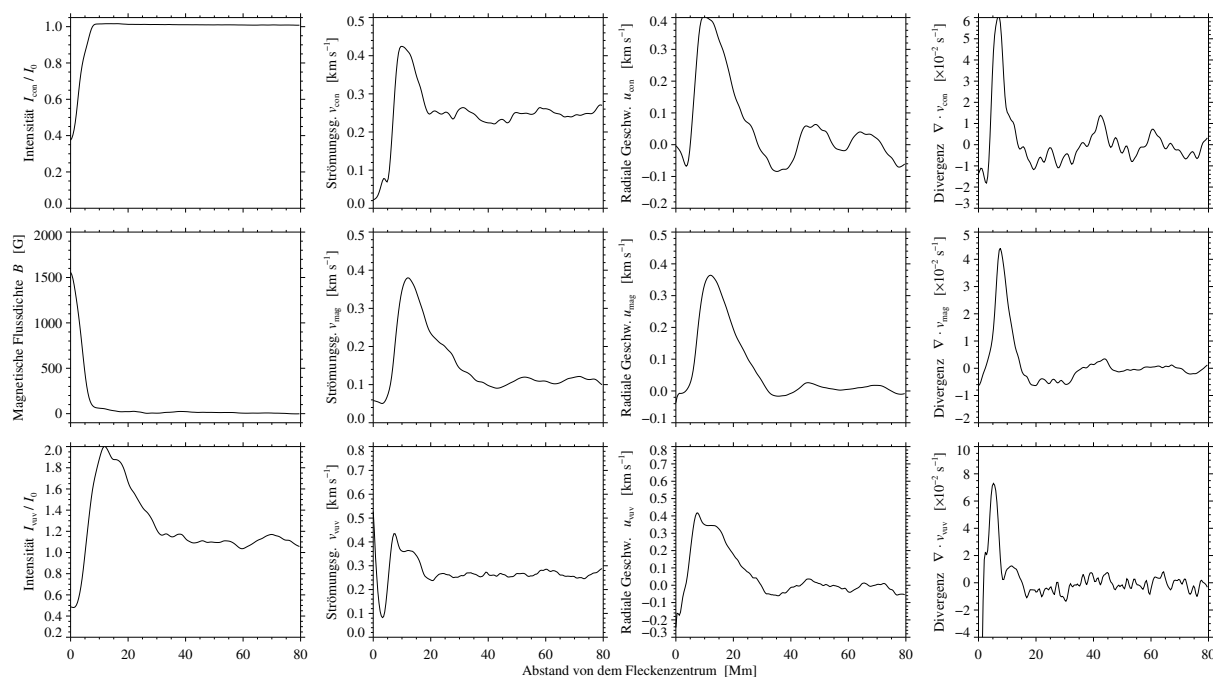
Datum	2014-01-05
Meridian Passage	13:11 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2710.2 Mm <sup>2</sup> / 29.4 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	296.4 Mm <sup>2</sup> / 9.7 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	107.1 Mm <sup>2</sup> / 5.8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	19.2 Mm <sup>2</sup> / 2.5 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N10



**Abbildung 6.40:** Hintergrundsabtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



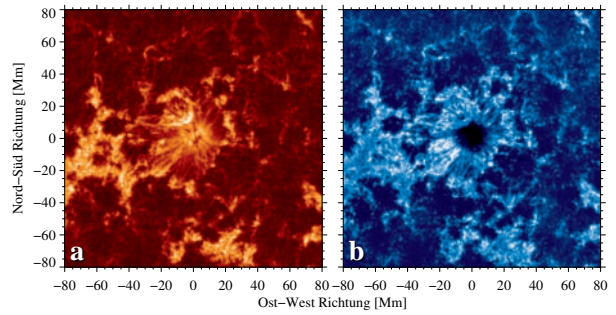
**Abbildung 6.41:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11942. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



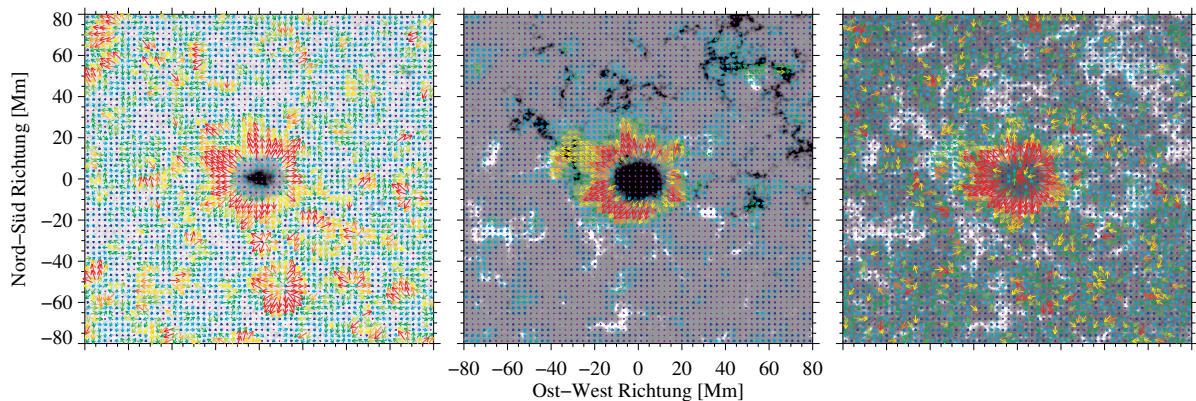
**Abbildung 6.42:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11948

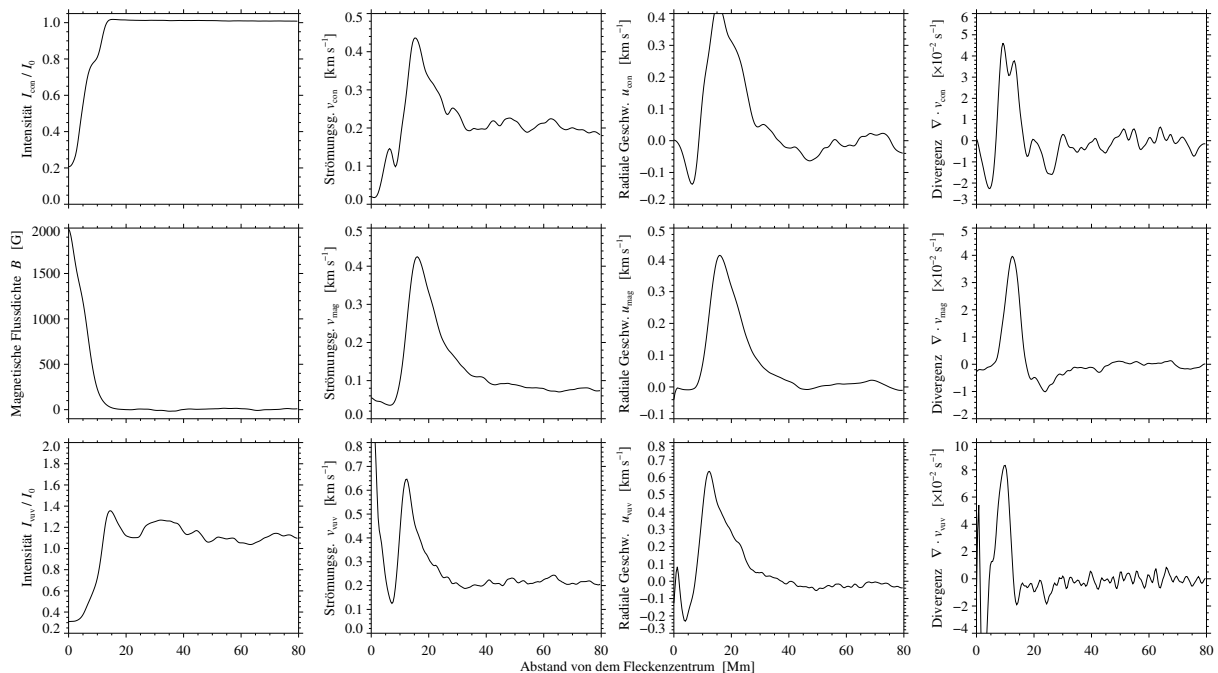
Datum	2014-01-11
Meridian Passage	23:13 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2674,3 Mm <sup>2</sup> / 29,2 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	426,2 Mm <sup>2</sup> / 11,6 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	421,0 Mm <sup>2</sup> / 11,6 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	86,0 Mm <sup>2</sup> / 5,2 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N06



**Abbildung 6.43:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.44:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11948. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 6.45:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

# Aktive Region 11955

Datum	2014-01-21
Meridian Passage	16:50 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1766,0 Mm <sup>2</sup> / 23,7 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	370,5 Mm <sup>2</sup> / 10,9 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	191,0 Mm <sup>2</sup> / 7,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	21,3 Mm <sup>2</sup> / 2,6 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S14

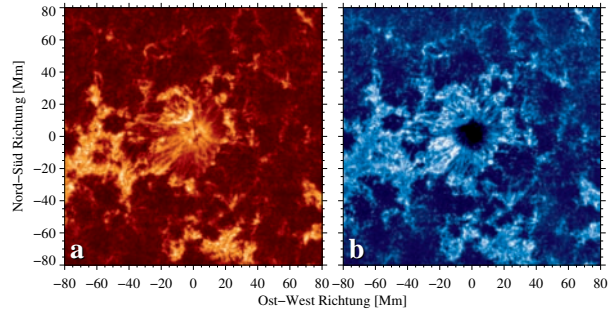


Abbildung 6.46: Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle| \rangle$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle| \rangle$

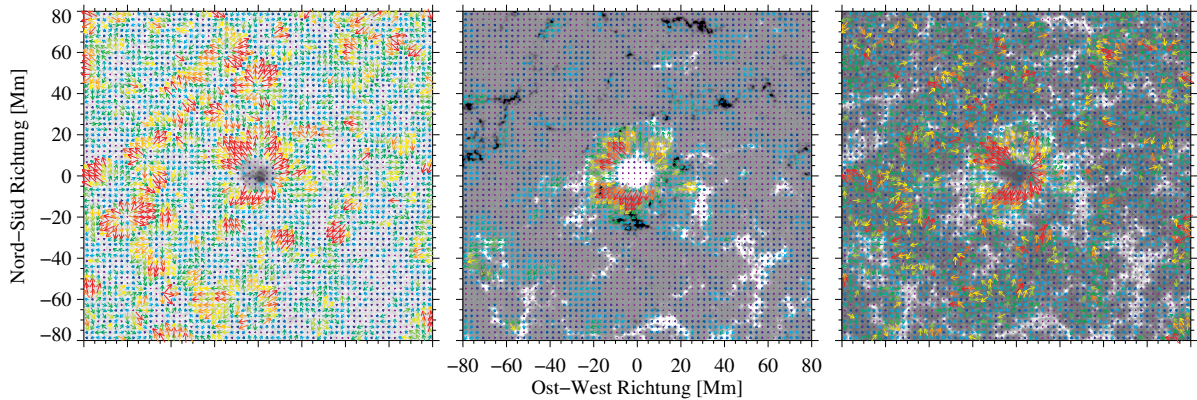


Abbildung 6.47: Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11955. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

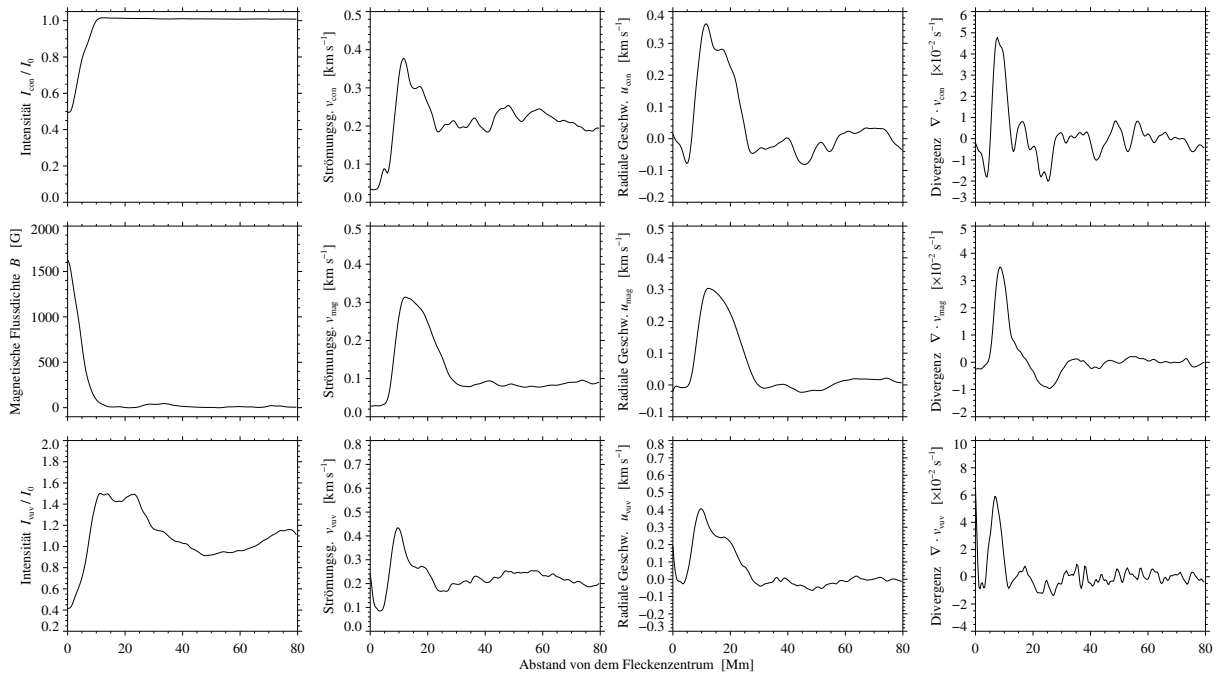
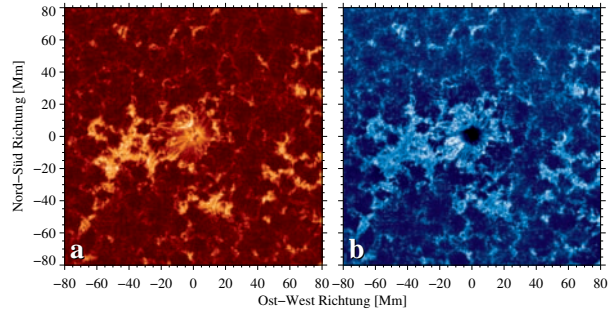


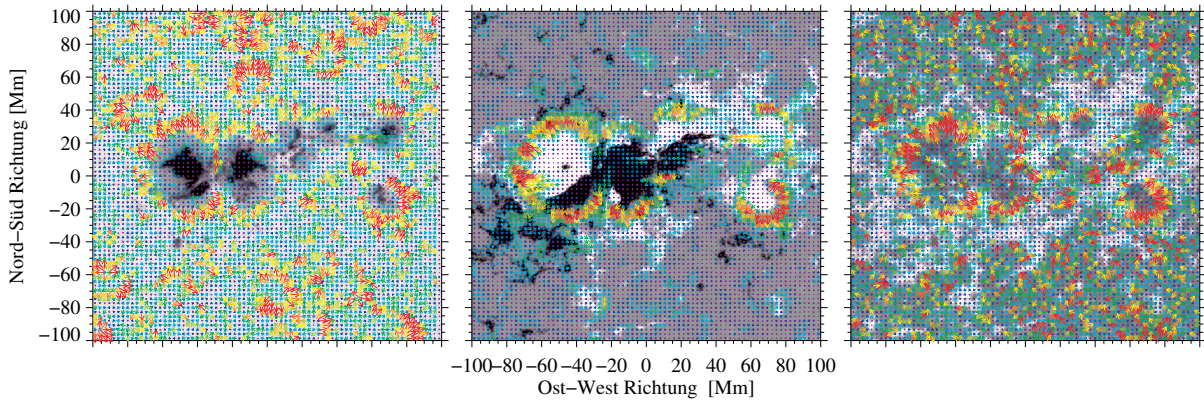
Abbildung 6.48: Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 11967

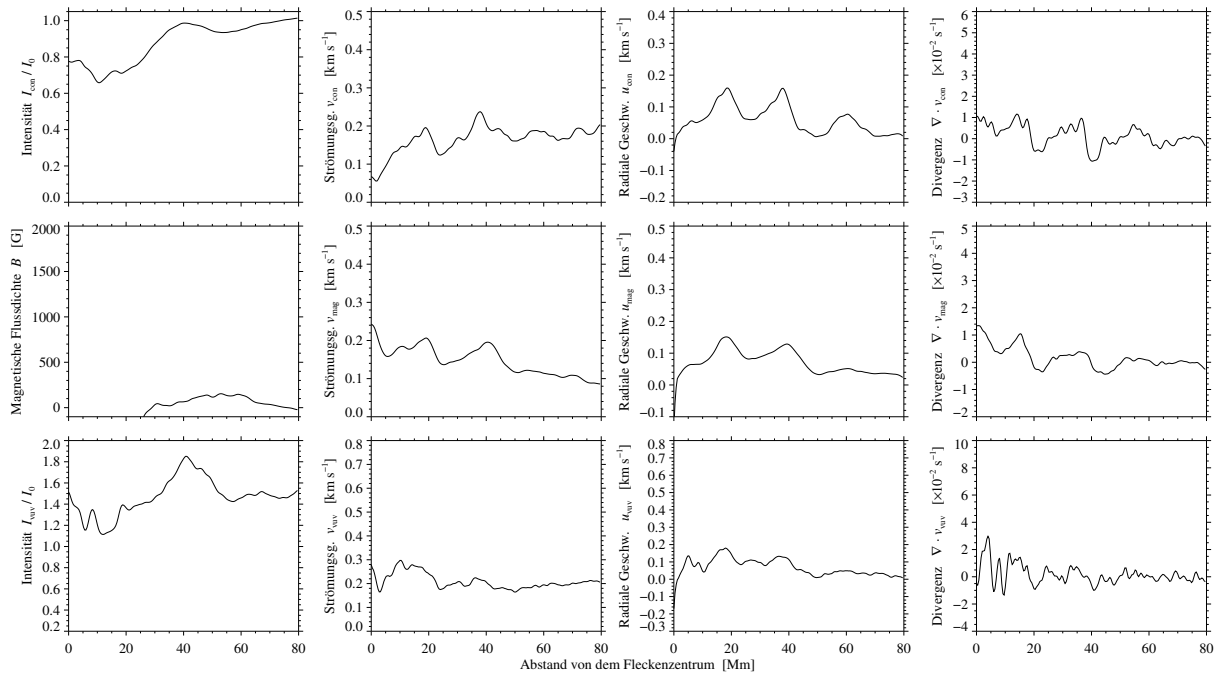
Datum	2014-02-03
Meridian Passage	02:01 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1287 Mm <sup>2</sup> / 20,2 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	211 Mm <sup>2</sup> / 8,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	143 Mm <sup>2</sup> / 6,7 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	15 Mm <sup>2</sup> / 2,2 Mm
Fleckentyp	$\beta\gamma\delta$
Breitengrad	S13



**Abbildung 6.49:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



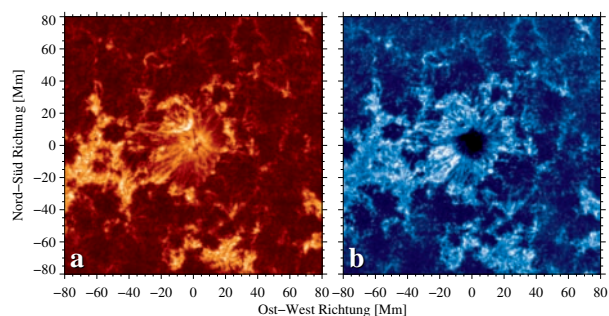
**Abbildung 6.50:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 11967. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



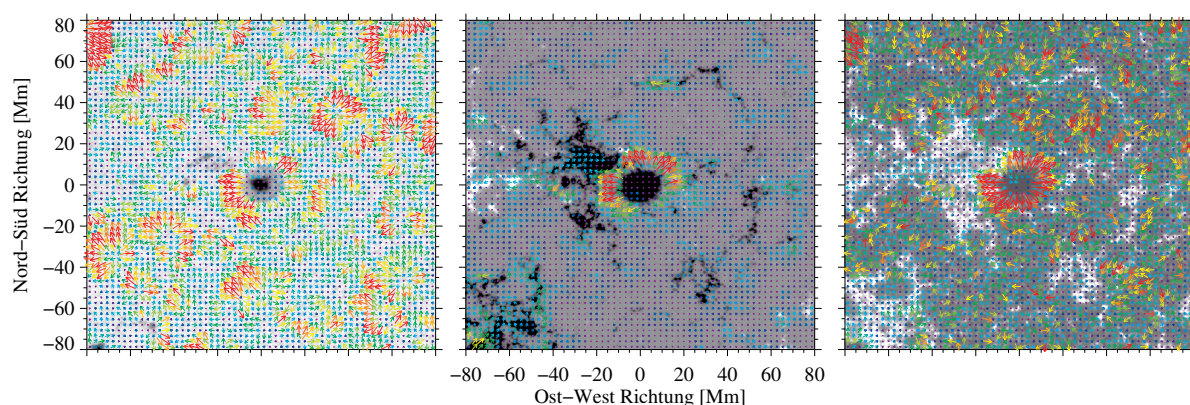
**Abbildung 6.51:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12018

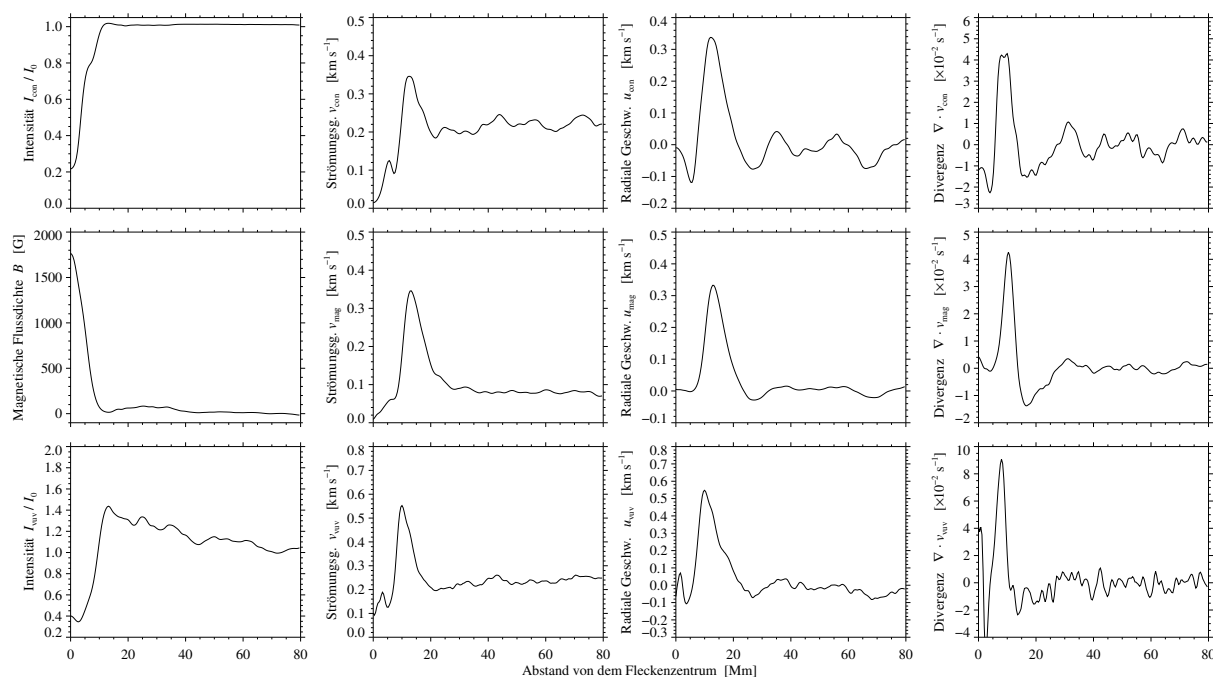
Datum	2014-03-27
Meridian Passage	06:38 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1121,6 Mm <sup>2</sup> / 18,9 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	273,3 Mm <sup>2</sup> / 9,3 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	269,2 Mm <sup>2</sup> / 9,3 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	49,5 Mm <sup>2</sup> / 4,0 Mm
Fleckentyp	$\beta$
Breitengrad	N03



**Abbildung 6.52:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



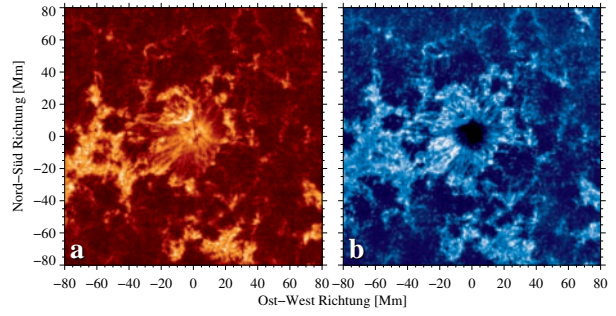
**Abbildung 6.53:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12018. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



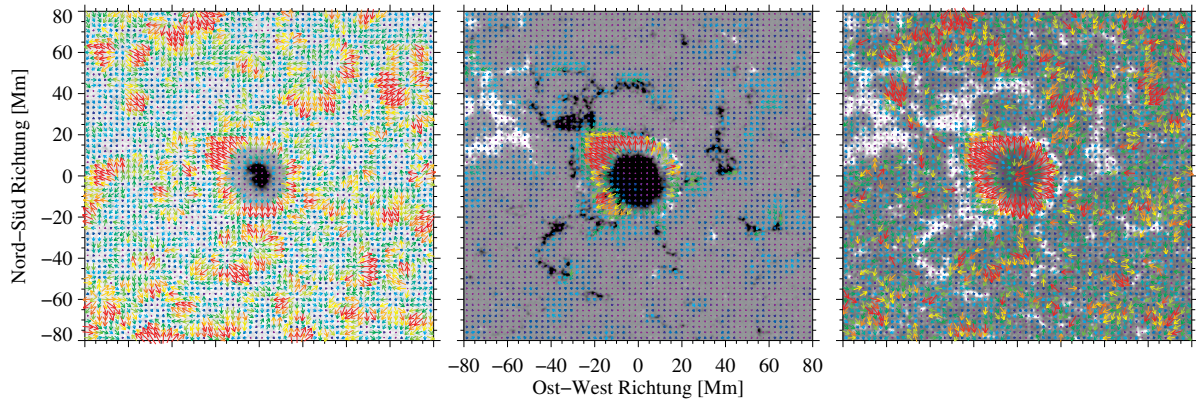
**Abbildung 6.54:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12032

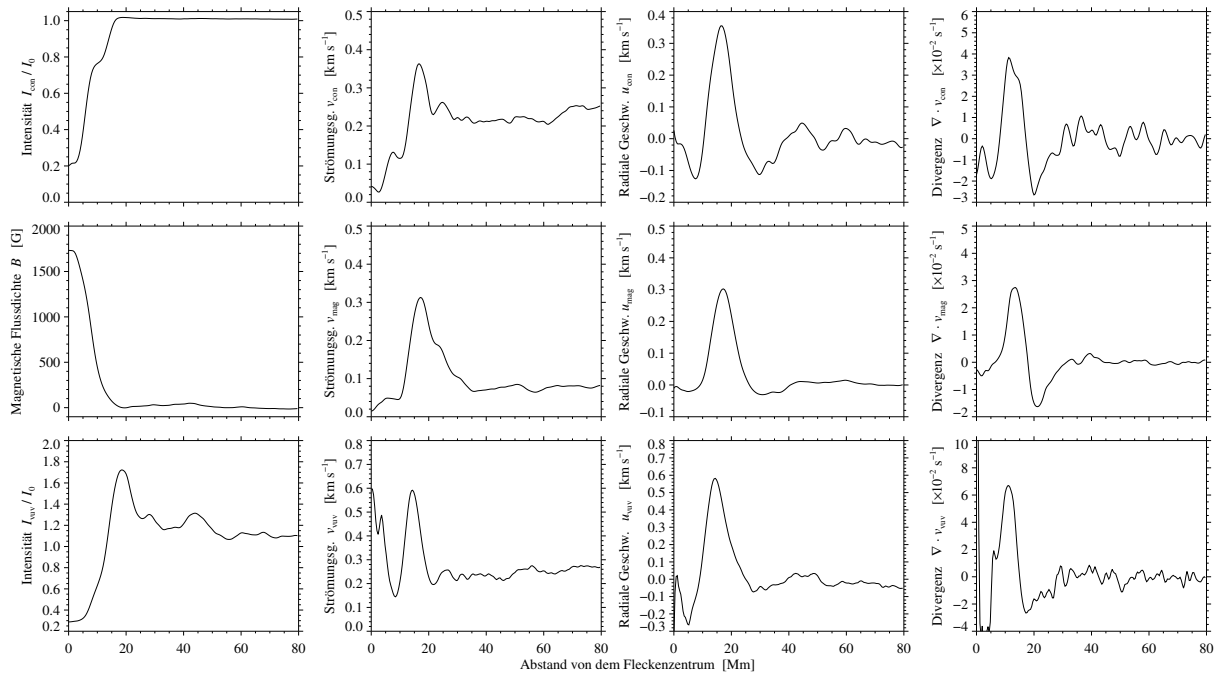
Datum	2014-04-13
Meridian Passage	18:06 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1599,6 Mm <sup>2</sup> / 22,6 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	607,7 Mm <sup>2</sup> / 13,9 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	626,4 Mm <sup>2</sup> / 14,1 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	128,0 Mm <sup>2</sup> / 6,4 Mm
Fleckentyp	$\beta\gamma$
Breitengrad	N13



**Abbildung 6.55:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



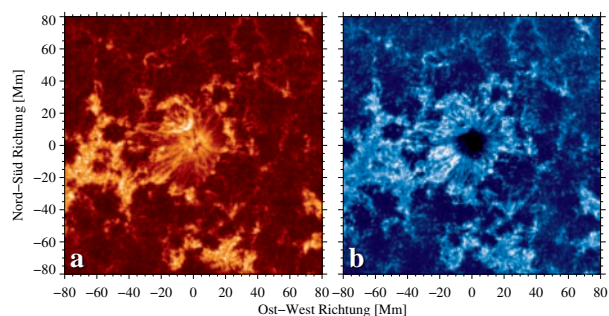
**Abbildung 6.56:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12032. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



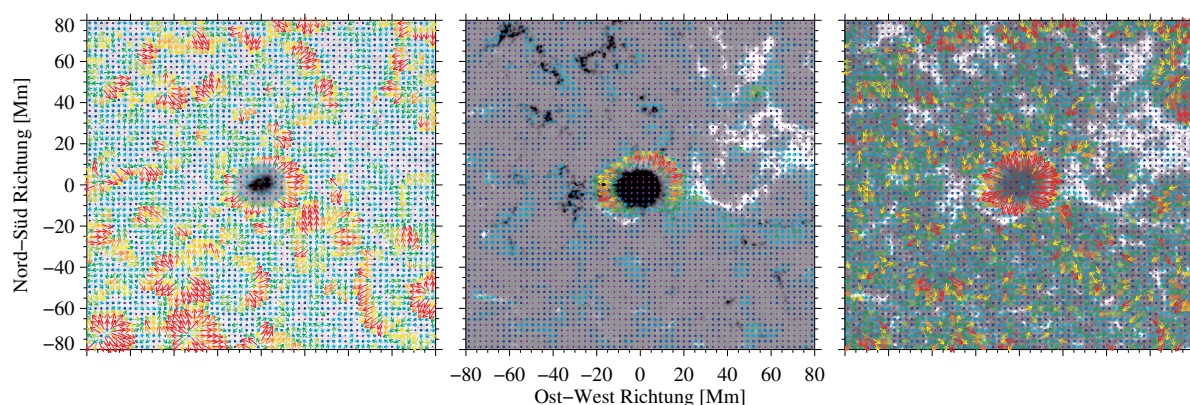
**Abbildung 6.57:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12033

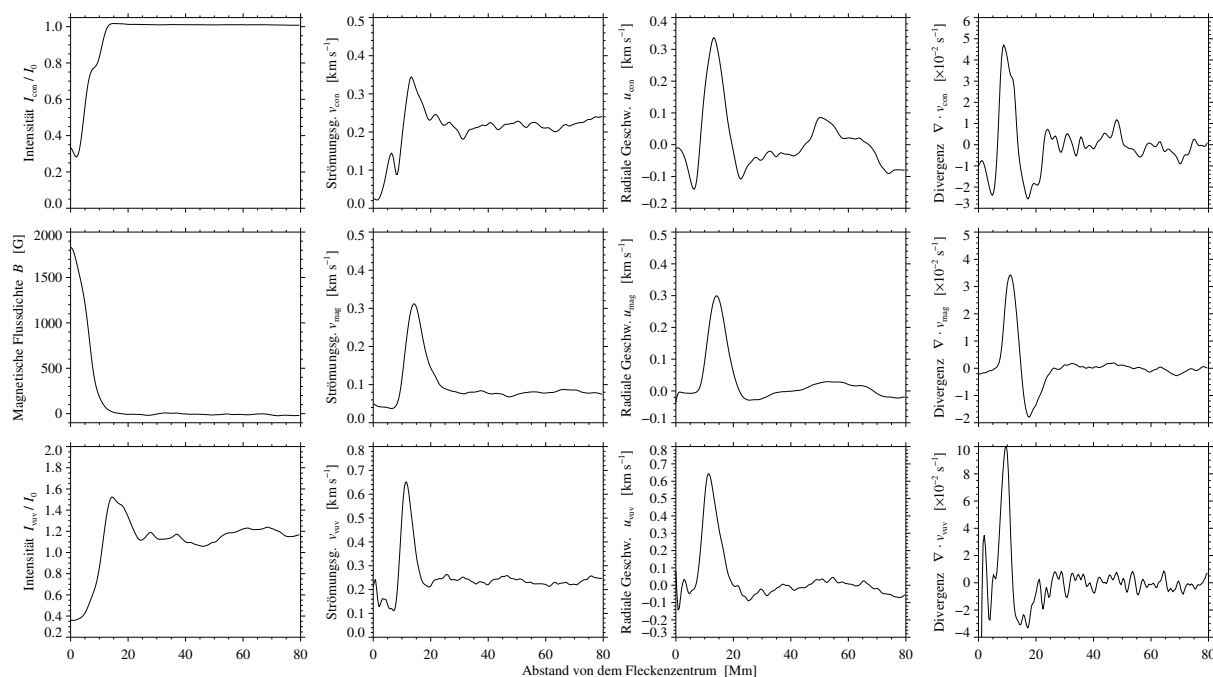
Datum	2014-04-14
Meridian Passage	15:42 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	784,2 Mm <sup>2</sup> / 15,8 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	396,0 Mm <sup>2</sup> / 11,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	389,7 Mm <sup>2</sup> / 11,1 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	77,8 Mm <sup>2</sup> / 5,0 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N12



**Abbildung 6.58:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.59:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12033. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.

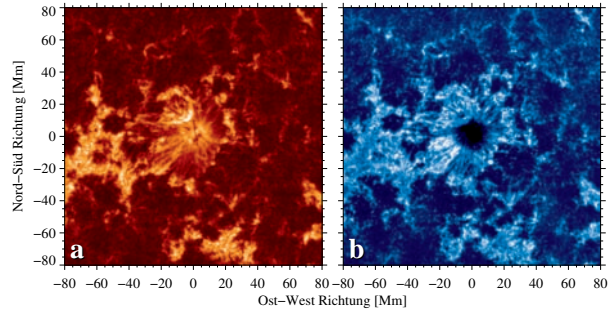


**Abbildung 6.60:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

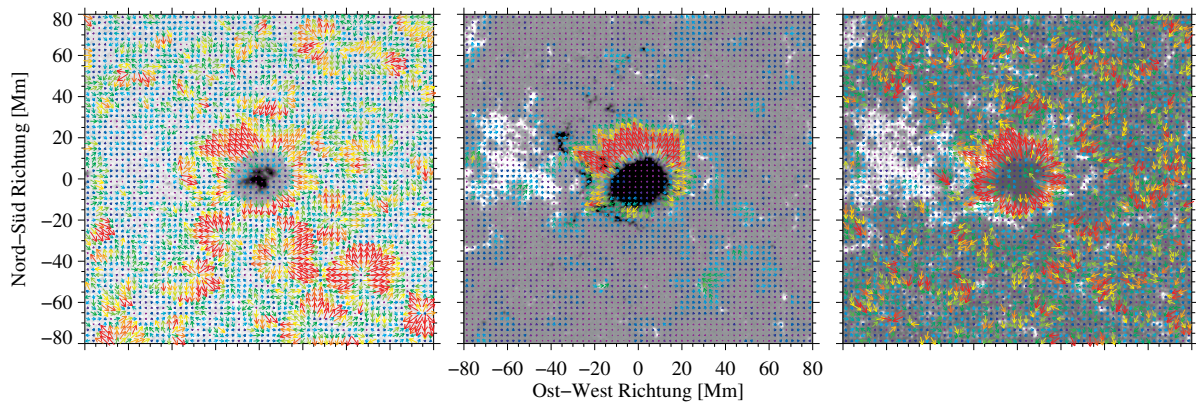


## Aktive Region 12042

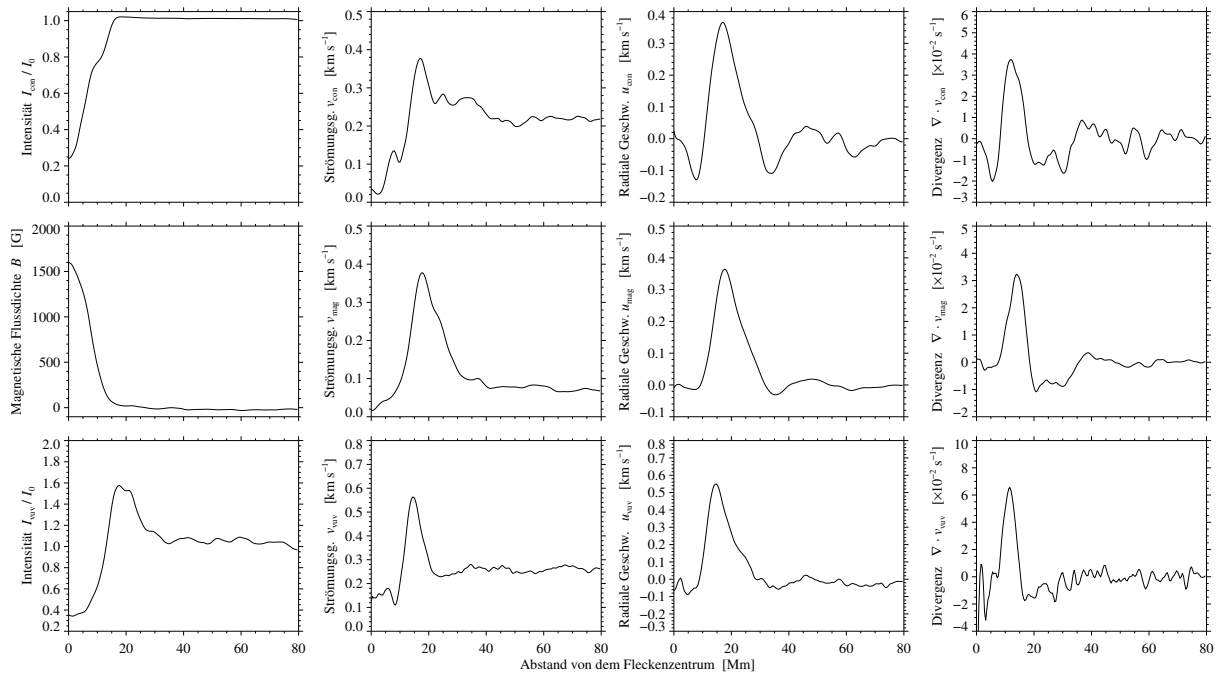
Datum	2014-04-21
Meridian Passage	22:54 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2215,4 Mm <sup>2</sup> / 26,6 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	620,3 Mm <sup>2</sup> / 14,1 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	596,0 Mm <sup>2</sup> / 13,8 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	116,6 Mm <sup>2</sup> / 6,1 Mm
Fleckentyp	$\beta$
Breitengrad	N19



**Abbildung 6.61:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



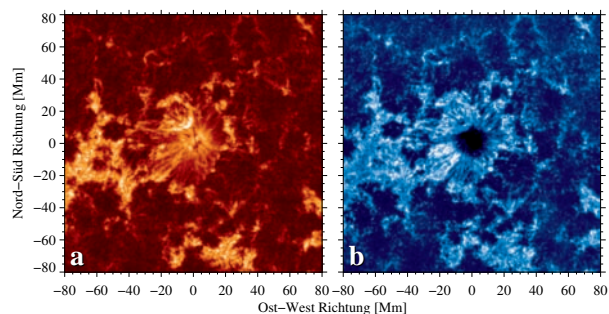
**Abbildung 6.62:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12042. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



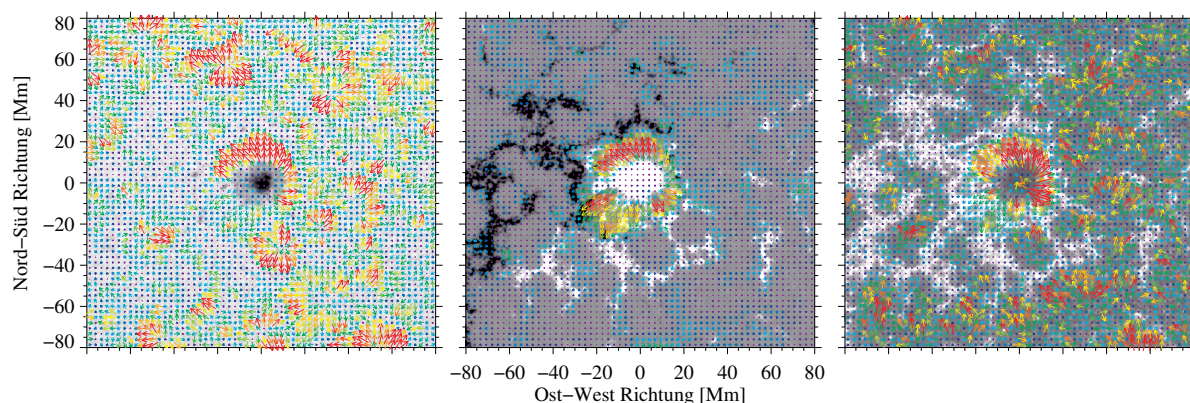
**Abbildung 6.63:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12045

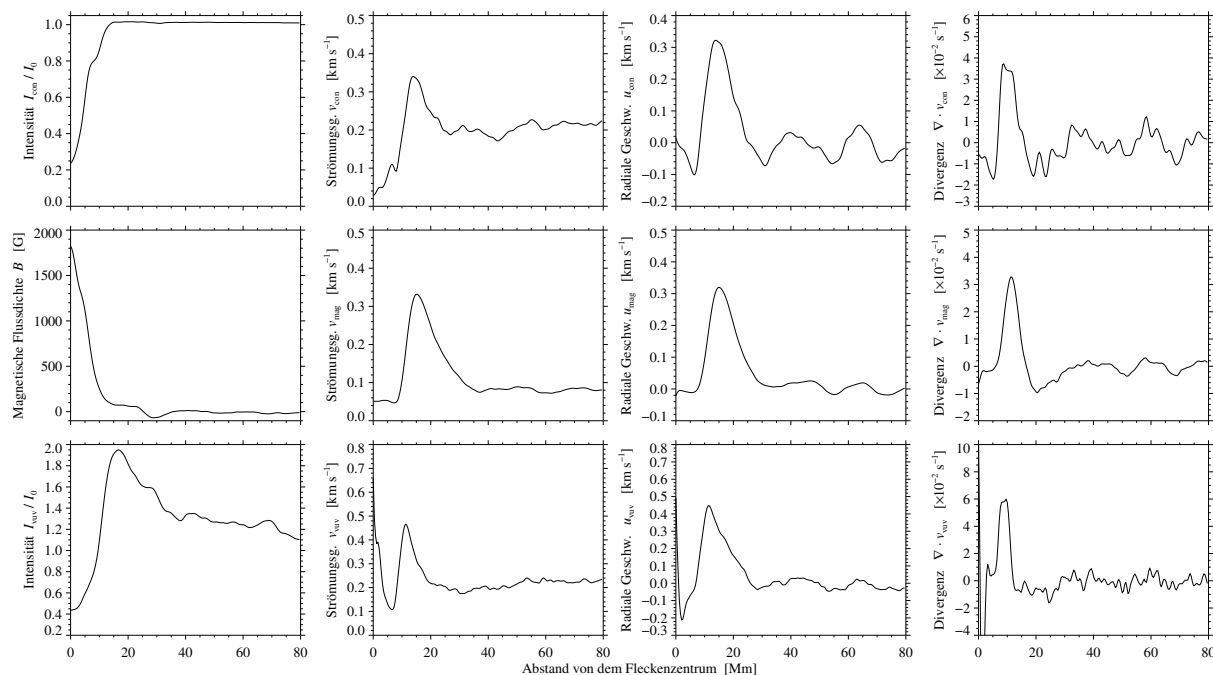
Datum	2014-04-25
Meridian Passage	18:36 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1813,0 Mm <sup>2</sup> / 24,0 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	566,6 Mm <sup>2</sup> / 13,4 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	388,6 Mm <sup>2</sup> / 11,1 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	2,2 Mm <sup>2</sup> / 4,8 Mm
Fleckentyp	$\beta$
Breitengrad	S25



**Abbildung 6.64:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



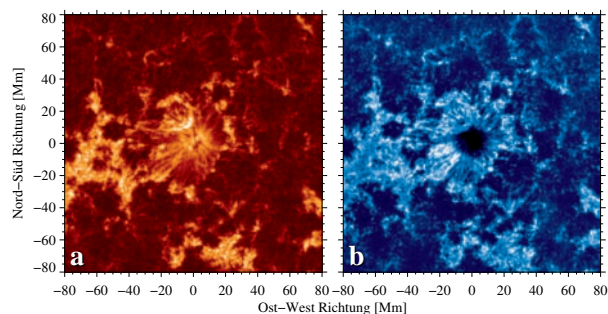
**Abbildung 6.65:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12045. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



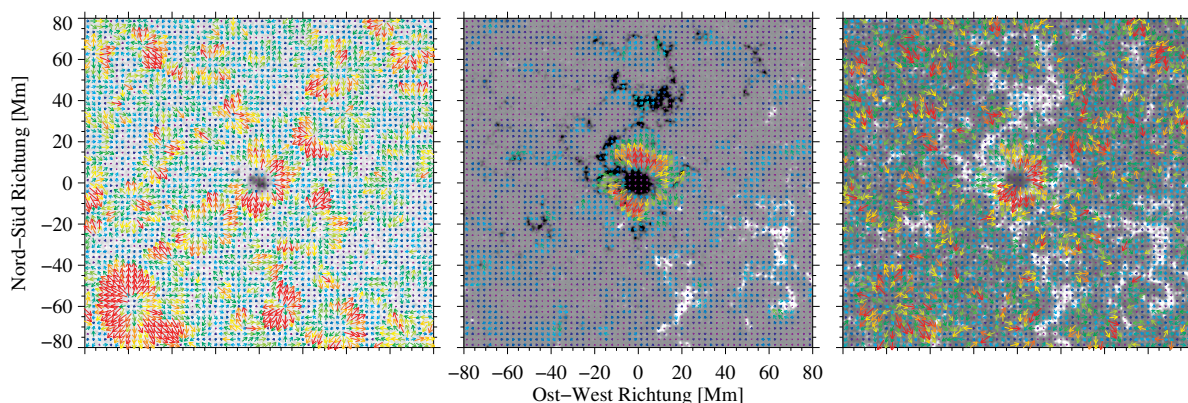
**Abbildung 6.66:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12050

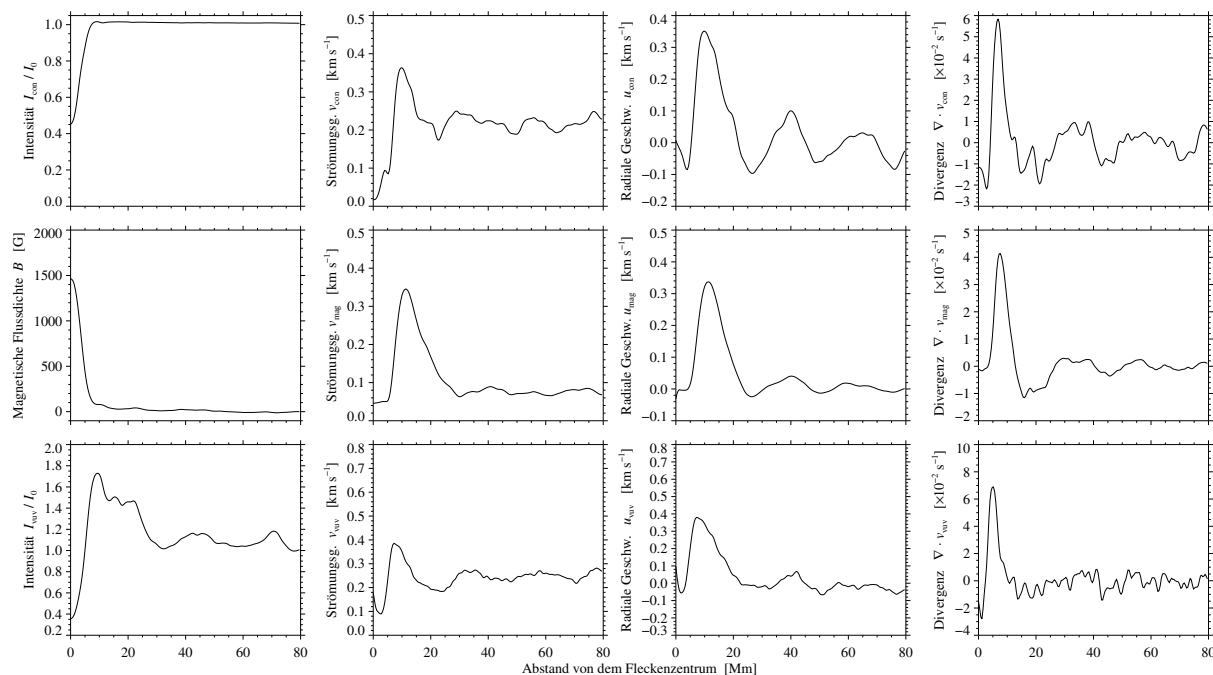
Datum	2014-05-03
Meridian Passage	12:42 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	940,7 Mm <sup>2</sup> / 17,3 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	327,2 Mm <sup>2</sup> / 10,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	91,3 Mm <sup>2</sup> / 5,4 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	17,6 Mm <sup>2</sup> / 2,4 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N12



**Abbildung 6.67:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



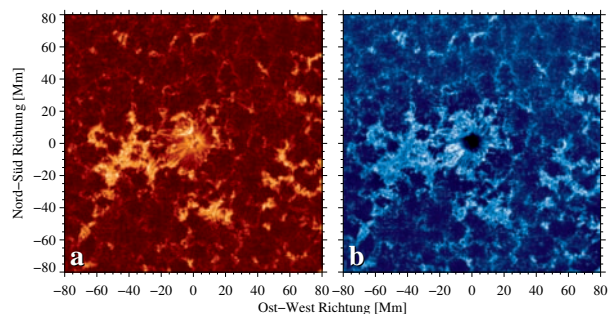
**Abbildung 6.68:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12050. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



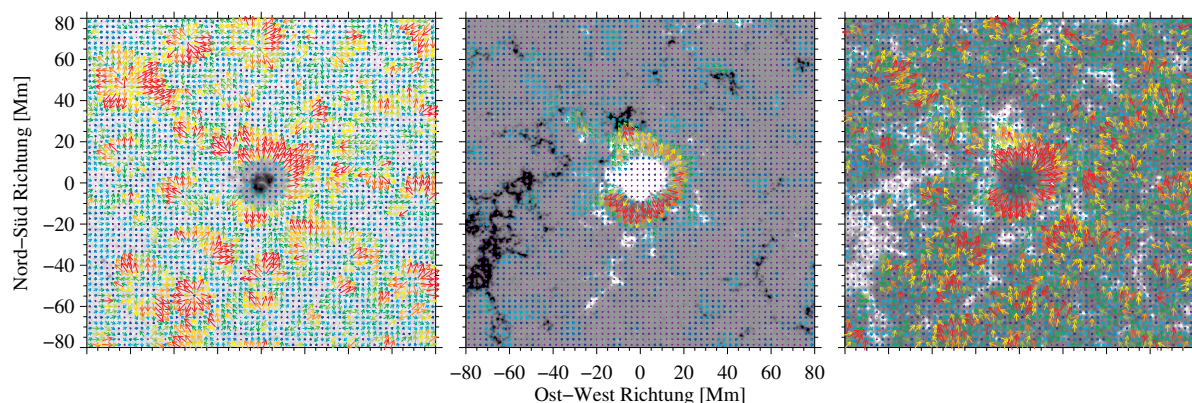
**Abbildung 6.69:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12061

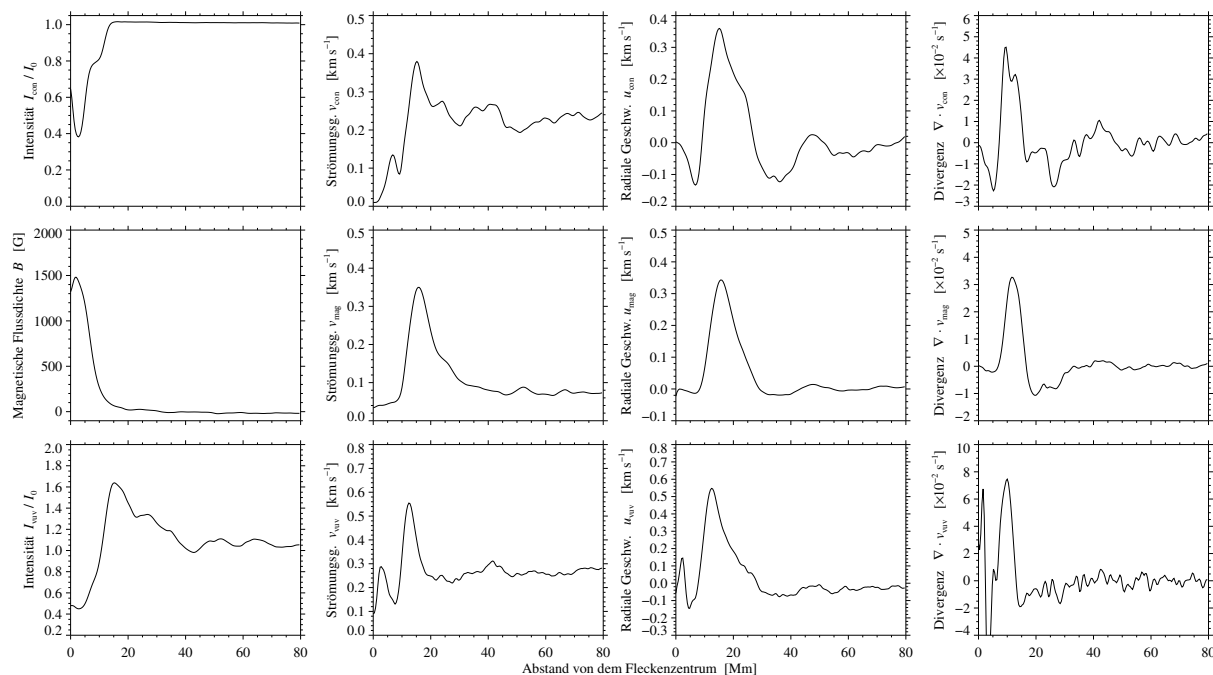
Datum	2014-05-17
Meridian Passage	23:13 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	1287 $\text{Mm}^2$ / 20,2 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	211 $\text{Mm}^2$ / 8,2 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	143 $\text{Mm}^2$ / 6,7 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	15 $\text{Mm}^2$ / 2,2 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	S25



**Abbildung 6.70:** Hintergrundsubtraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



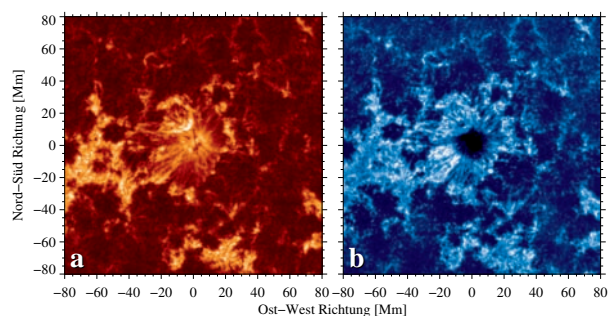
**Abbildung 6.71:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12061. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



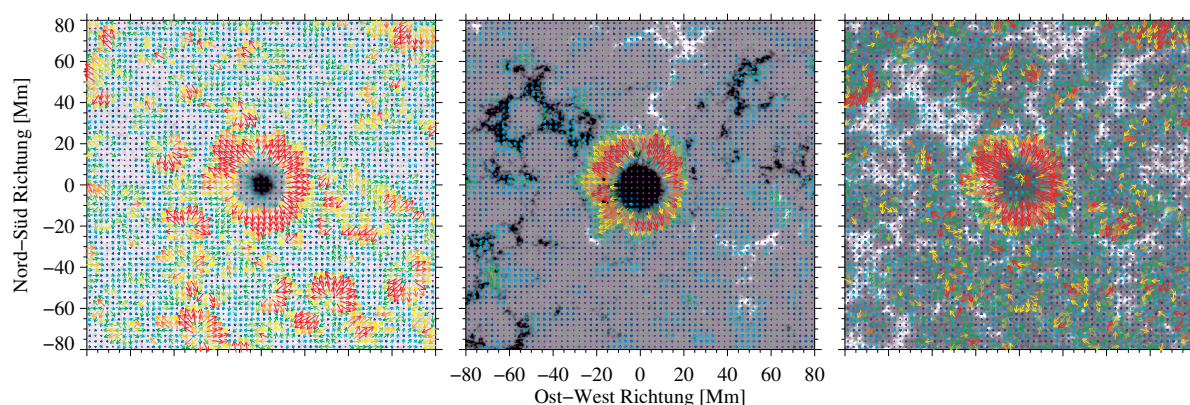
**Abbildung 6.72:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12081

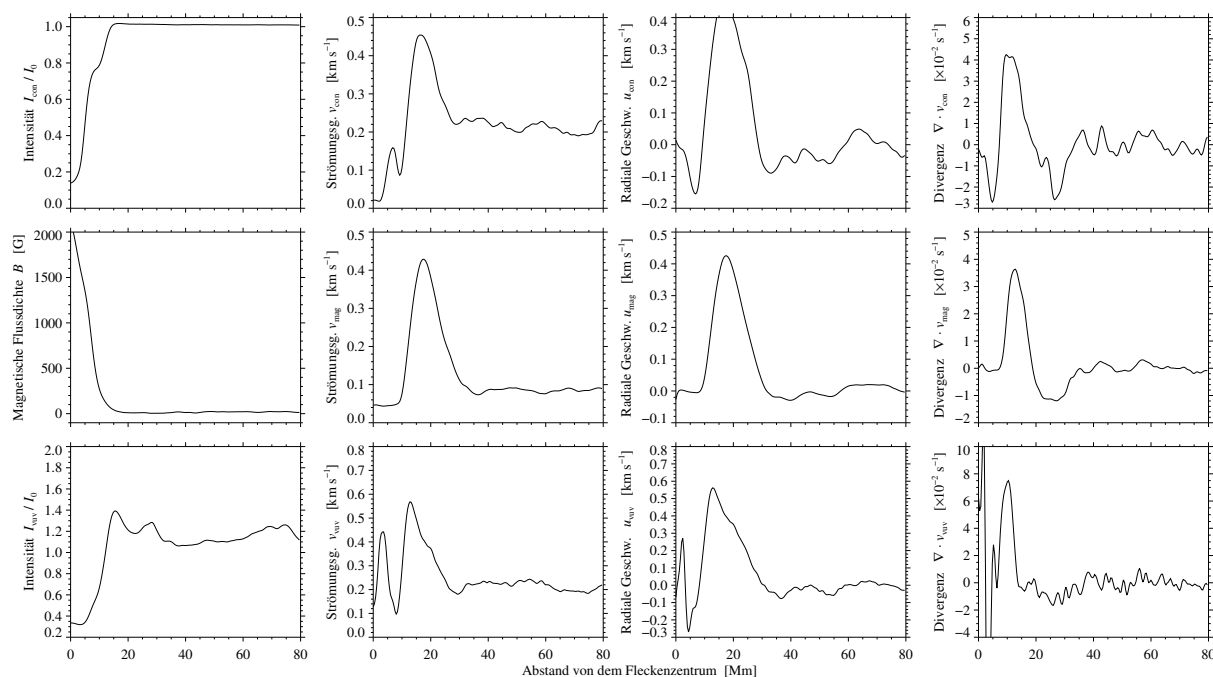
Datum	2014-06-06
Meridian Passage	23:45 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2282,7 Mm <sup>2</sup> / 27,0 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	493,8 Mm <sup>2</sup> / 12,5 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	470,4 Mm <sup>2</sup> / 12,2 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	100,6 Mm <sup>2</sup> / 5,7 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N05



**Abbildung 6.73:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



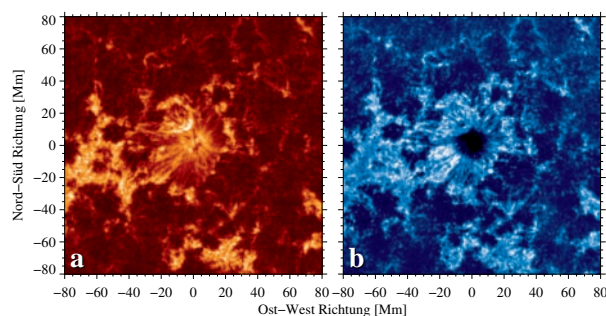
**Abbildung 6.74:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12081. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



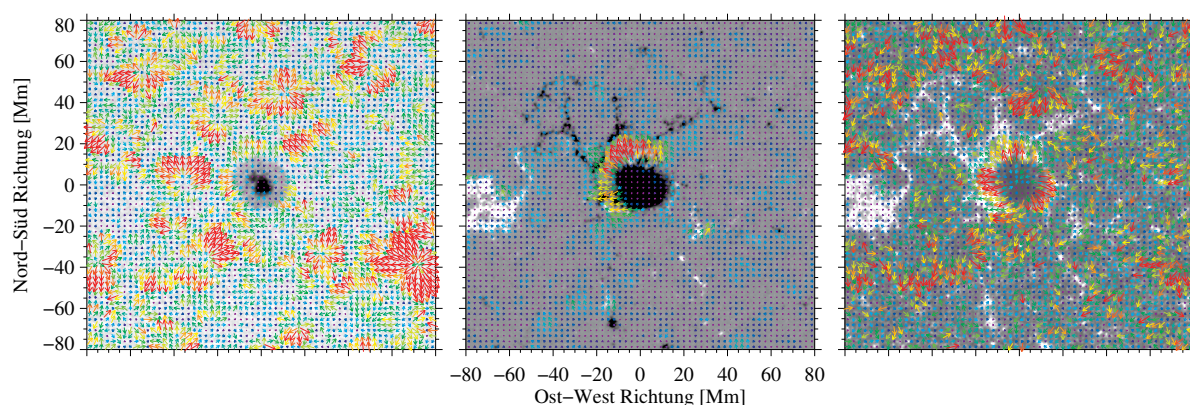
**Abbildung 6.75:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12090

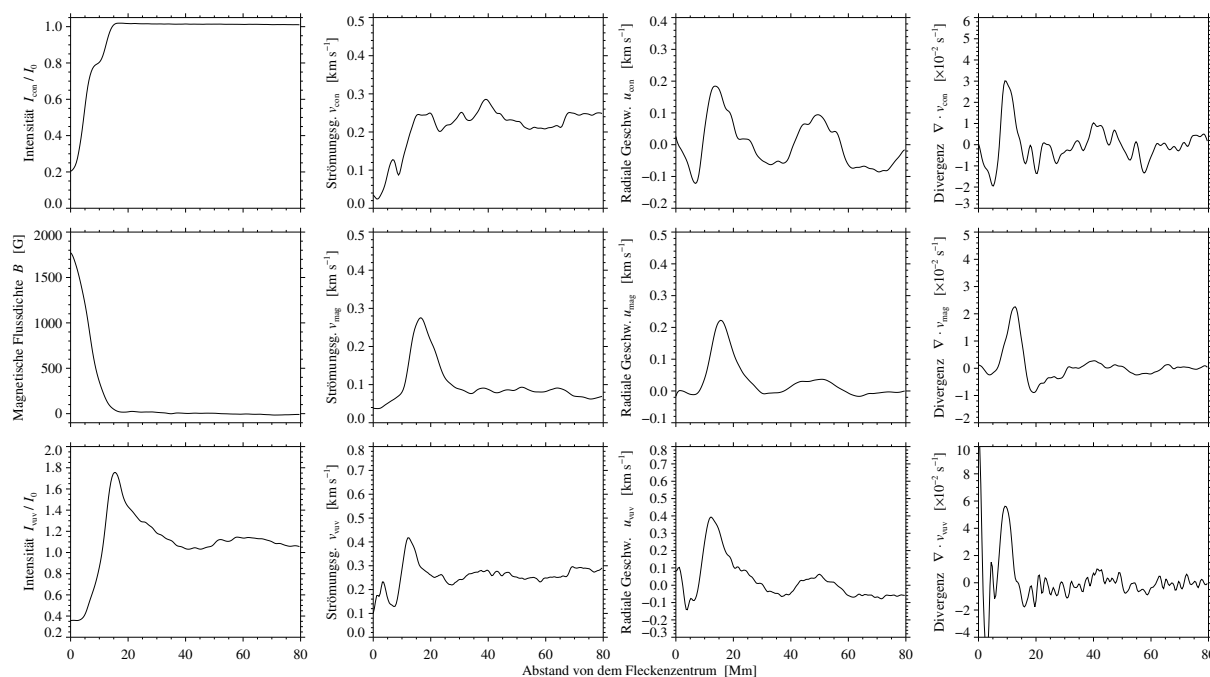
Datum	2014-06-17
Meridian Passage	03:02 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	905,0 Mm <sup>2</sup> / 17,0 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	558,6 Mm <sup>2</sup> / 13,3 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	495,8 Mm <sup>2</sup> / 12,6 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	81,6 Mm <sup>2</sup> / 5,1 Mm
Fleckentyp	$\alpha$
Breitengrad	N24



**Abbildung 6.76:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



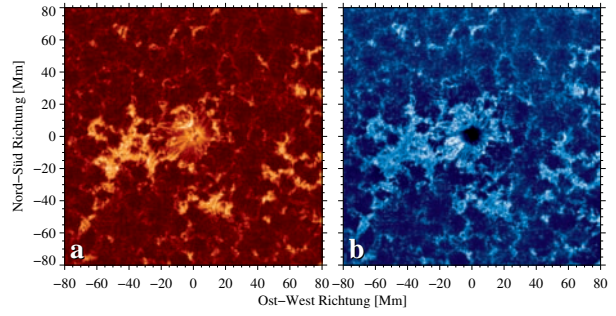
**Abbildung 6.77:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12090. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



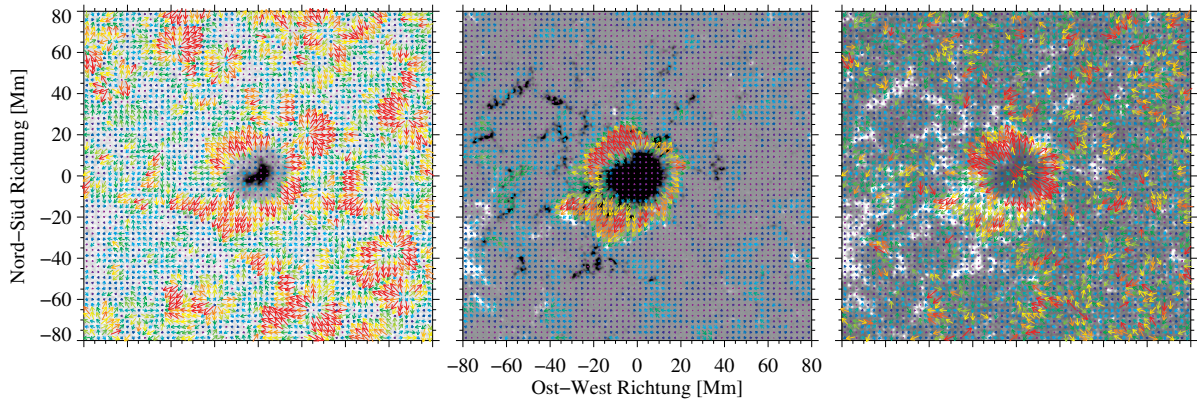
**Abbildung 6.78:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Aktive Region 12090

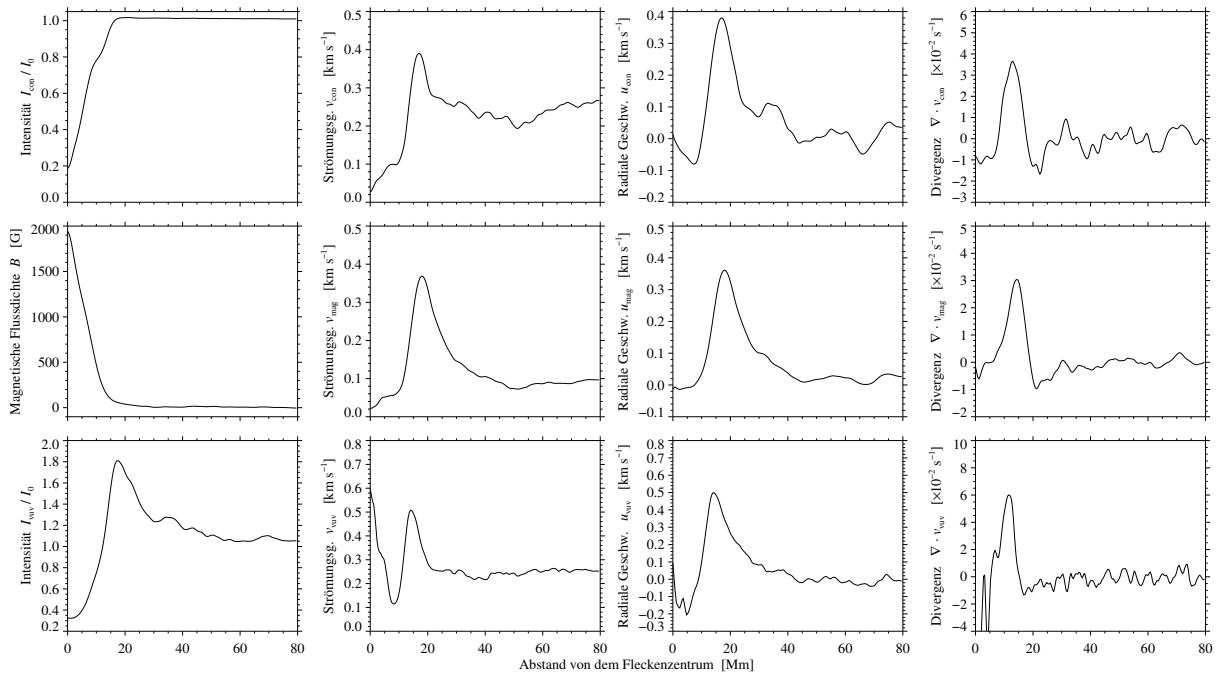
Datum	2014-08-11
Meridian Passage	08:11 UT
$A_{\text{moat}} / r_{\text{moat}}$	2471,1 Mm <sup>2</sup> / 28,0 Mm
$A_{\text{mag}} / r_{\text{mag}}$	748,8 Mm <sup>2</sup> / 15,4 Mm
$A_{\text{spot}} / r_{\text{spot}}$	608,3 Mm <sup>2</sup> / 13,9 Mm
$A_{\text{umbra}} / r_{\text{umbra}}$	113,7 Mm <sup>2</sup> / 6,0 Mm
Fleckentyp	$\beta$
Breitengrad	N12



**Abbildung 6.79:** Hintergrundsabstraktion der (a) magnetischen Flussdichte  $\langle |B - \langle B \rangle|$  und der VUV Intensität  $\langle |I - \langle I \rangle|$



**Abbildung 6.80:** Die Strömungskarten wurden mit LCT und DAVE erstellt. Sie basieren auf der Kontinuumsintensität  $I_{\text{con}}/I_0$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der VUV Intensität  $I_{\text{VUV}}$  bei 160 nm der aktiven Region NOAA 12090. Die farbigen Vektoren stehen für Betrag und Richtung der horizontalen Strömungen. Violette Vektoren beschreiben Geschwindigkeiten, die niedriger als  $0,05 \text{ km s}^{-1}$  sind, und rote Vektoren gehören zu Geschwindigkeiten die größer, als  $0,25 \text{ km s}^{-1}$  sind.



**Abbildung 6.81:** Verlauf charakteristischer Parameter gegen den zunehmenden Radius aufgetragen werden. Kontinuumsbilder, Magnetogramme und VUV Bilder werden von oben nach unten dargestellt. Die auf die ruhige Sonne normierte Intensität  $I/I_0$ , der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , die mittlere radiale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und die Divergenz  $\nabla \cdot v$  werden von links nach rechts gezeigt.

## Appendix B – Abkürzungen

<b>AIA</b>	Atmospheric Imaging Assembly
<b>AIP</b>	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Device
<b>CME</b>	Coronal Mass Ejection
<b>CST</b>	Coherent Structure Tracking
<b>CUD</b>	Central Umbral Dots
<b>DAVE</b>	Differential Affine Velocity Estimator
<b>DB</b>	Diffuse Background
<b>DN</b>	Dark Nucleus
<b>e-INIS</b>	Irish National e-Infrastructure
<b>EUV</b>	Extrem UltraViolett
<b>EVE</b>	Extreme ultraviolet Variability Experiment
<b>ESP</b>	EUV Spectro-Photometer
<b>FITS</b>	Flexible Image Transport System
<b>FLB</b>	Faint Light-Bridge
<b>FWHM</b>	Full-Width-at-Half-Maximum
<b>HMI</b>	Helioseismic and Magnetic Imager
<b>IDL</b>	Interactive Data Language
<b>JSOC</b>	Joint Science Operations Center
<b>KIS</b>	Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik
<b>LCT</b>	Local Correlation Tracking
<b>LOS</b>	Line-of-Sight
<b>LWS</b>	Living with a Star
<b>MEGS</b>	Multiple EUV Grating Spectrograph
<b>MF</b>	Moat Flow
<b><math>\mu</math>H</b>	Mikrohemisphären, Millionstel Hemisphäre
<b>MMF</b>	Moving Magnetic Features
<b>MPS</b>	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>P</b>	Penumbra
<b>PRODEX</b>	Programme de Développement d'Expériences Scientifiques
<b>PUD</b>	Peripheral Umbral Dots
<b>QS</b>	Quiet Sun
<b>ROI</b>	Region-of-Interest
<b>SAM</b>	Solar Aspect Monitor
<b>SDO</b>	Solar Dynamics Observatory
<b>SLB</b>	Strong Light-Bridge
<b>SoHO</b>	Solar Helioseismic Observatory
<b>STEREO</b>	Solar TERrestrial RELations Observatory
<b>SWAP</b>	Sun Watcher with APS detectors and image Processing
<b>U</b>	Umbra
<b>UD</b>	Umbral Dots



## Selbstständigkeitserklärung

Der Verfasser erklärt, dass er die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt hat. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Potsdam, 16. März 2015 .....

Philipp Kummerow