

Am 30. März 2020 in der Zeit um 20:48 Uhr MESZ überflogen zahlreiche Starlink-Satelliten der vierten Gruppe (Mitte) den Beobachtungsort von Hamze Beati in Schleswig-Holstein. Während der rund 13-minütigen Intervallbelichtung zog auch die Internationale Raumstation ISS (rechts oben) durch das Gesichtsfeld.

Hamze Beati

Sonne, Mond und Starlink

Es war einmal: der Sternenhimmel. In den kommenden Jahren werden ihn mehr als 10000 neue Satelliten stark verändern – mit unabsehbaren Folgen.

Als der US-Astronom Anthony »Tony« Tyson im Jahr 2015 zum ersten Mal von Elon Musks Starlink-Projekt hörte, machte er sich keine großen Sorgen. »Wir dachten alle, es würde sich um kleine Satelliten handeln«, sagt Tyson. Doch im Mai 2019 kam für den 80-jährigen Forscher der Schock. Die Satelliten, die Elon Musks Firma SpaceX im Weltall aussetzte, waren nicht

denen der Sternenhimmel von hässlichen Streifen verdeckt wird: Gruppen von Starlink-Satelliten, die während der langen Belichtungszeit durch das Sichtfeld eines Teleskops gezogen sind (siehe Bild S. 17). Für Tyson war spätestens jetzt Alarmstufe Rot angesagt: Schließlich ist er der führende Kopf hinter einem ambitionierten neuen Observatorium, das seit fünf Jah-

ter anderem weit entfernte Supernova-Explosionen aufspüren – und damit die Ausdehnung des Weltalls besser kartieren als bisher. Es ist ein Projekt, das Astrophysiker in aller Welt gespannt erwarten, weil damit die rätselhafte Dunkle Energie erforscht werden soll und dabei helfen könnte, eine hitzig geführte Debatte über die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Alls aufzulösen.

»Das ist die Industrialisierung des Weltraums«

Tony Tyson, University of California

klein. Und sie waren auch nicht dunkel, sondern reflektierten das Licht der Sonne. Menschen konnten sie Tage nach dem Start mit bloßem Auge sehen: eine Perlenkette hell leuchtender Punkte, die rasch über den Nachthimmel zog (siehe Bild oben).

Die neuen Himmelsobjekte schienen auch große Observatorien zu stören. Im Internet machten Bilder die Runde, auf

ren auf einem 2600 Meter hohen Berg in Chile entsteht – und wegen der Starlink-Satelliten weit hinter seinen Möglichkeiten zurückbleiben könnte. In diesem Jahr soll das Vera C. Rubin Observatory auf dem Cerro Pachón in Chile fertig werden; es war bislang unter dem Namen Large Synoptic Survey Telescope (LSST) bekannt. Mit ihm wollen Tyson und sein Team un-

60 Satelliten mit jedem Start

Doch Starlink wird die Leistungsfähigkeit des Observatoriums empfindlich verringern, fürchtet Tyson. Denn SpaceX plant, immer mehr der Satelliten auszusetzen – mit bis zu zwei Raketenstarts pro Monat. Im Mai 2019 brachte das US-Unternehmen die ersten 60 Exemplare in den Orbit, im November 2019 noch einmal so viele. Seitdem kommen regelmäßig neue dazu: 60 Satelliten am 7. Januar 2020, 60 am

29. Januar, 60 am 17. Februar und 60 am 18. März. Im April sollte der nächste Start stattfinden.

Und letztlich ist das erst der Anfang: SpaceX hat bereits Lizenzen für 12000 Kommunikationssatelliten erworben, 30000 weitere sind beantragt. Wenn Starlink Ende der 2020er Jahre vollständig ist, sollen die Satelliten in diversen Erdumlaufbahnen unterwegs sein – in Höhen von 340 km (7518 Satelliten), 550 km (1584 Satelliten) und 1200 km (2825 Satelliten) – und die Erde wie ein engmaschiges Netz umgeben und somit große Teile des Globus lückenlos mit Internet zu versorgen.

SpaceX ist mit dieser Vision nicht allein: Das britische Unternehmen OneWeb möchte 650 Satelliten in diverse Erdumlaufbahnen bringen, 40 sind bereits gestartet. Das Unternehmen hat durch den Einfluss von Covid-19 Ende März allerdings Insolvenz angemeldet. Eine weitere Firma will sich einen Teil des Marktes sichern: Amazon. Deren ähnliche Pläne laufen unter dem Projektnamen Kuiper und sehen 3236 Satelliten vor.

Aus 5685 werden 20000 Satelliten

Wie sehr diese Megakonstellationen den Weltraum verändern werden, zeigt ein Blick in die Geschichte der Raumfahrt: Seit Sputnik hat die Menschheit insgesamt erst 9285 Objekte ins All gebracht. Aktuell befinden sich noch 5685 von ihnen in einer Erdumlaufbahn, der Rest ist zurück zur Erde gestürzt oder in der Atmosphäre verglüht. Starlink und seine Konkurrenten werden also die Zahl der Satelliten vervielfachen – und den Raum über unseren Köpfen in eine umkämpfte Ressource verwandeln (siehe Bild rechts und S.16).

Anfangs konnten Himmelsbeobachter nur mutmaßen, wie schlimm das Ganze werden würde. Empörte Astronomen schrieben sich auf Twitter den Frust von der Seele; und Elon Musk tat wenig, um ihre Sorgen zu zerstreuen. Mittlerweile haben sich die Gemüter etwas beruhigt, und SpaceX hat eine Kooperation mit Observatorien angekündigt. Zudem gibt es jetzt Simulationen dazu, wie sichtbar die Satelliten nachts sein werden (siehe Bild S. 18).

Eine davon hat Jonathan McDowell vom Harvard Smithsonian Center for Astrophysics für die volle Megakonstellation aus 12000 Starlink-Satelliten erstellt. Die Sichtbarkeit der Satelliten variiert demnach je nach Breitengrad und Nachtzeit. Bewoh-

ner im südlichen Großbritannien werden im Sommer beispielsweise noch um Mitternacht 200 Satelliten mit dem bloßen Auge erspähen können. Der niederländische Astronom Cees Bassa kam bereits im Oktober 2019 zu ähnlichen Ergebnissen.

Eine ernsthafte Bedrohung für Kultur und Forschung

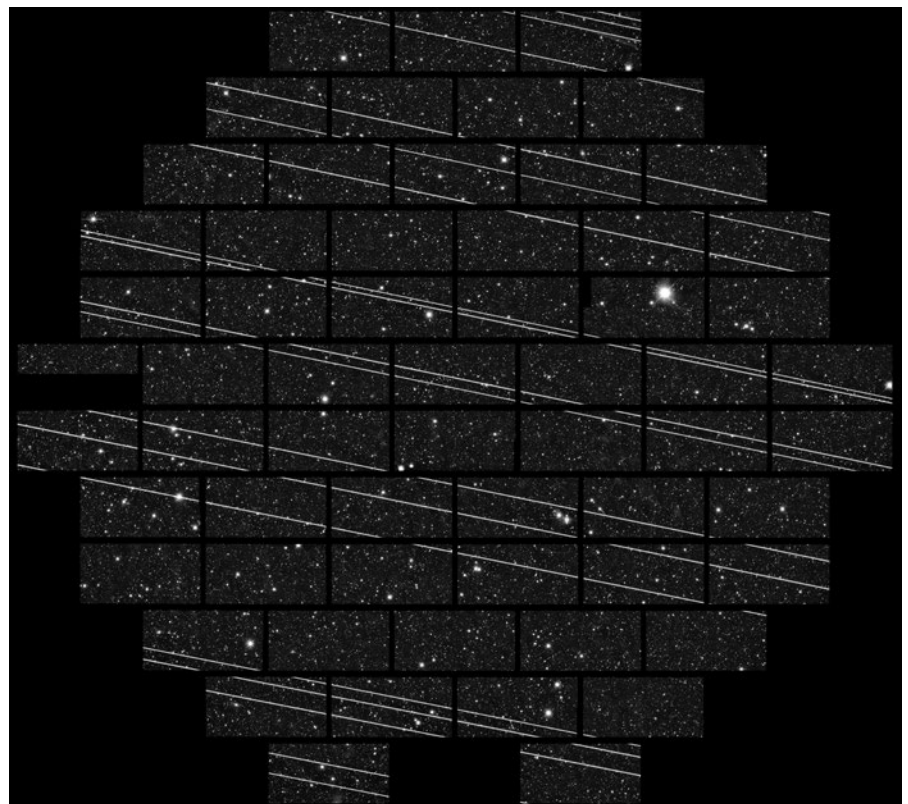
Damit werden sich die Satelliten hierzu-lande vermutlich weniger in Ballungsgebieten bemerkbar machen, wo ohnehin nur sehr helle Sterne sichtbar sind, als in Lichtschutzgebieten. Die Dunkelheit steht in diesen Sterneparks gewissermaßen unter Schutz; Bewohner und Besucher sind dazu angehalten, künstliche Beleuchtung so sparsam wie möglich einzusetzen. So sollen Menschen einen relativ unbeeinträchtigten Nachthimmel erleben können, an dem man beispielsweise ohne Probleme die Milchstraße erkennt. Die Simulationen von McDowell und Bassa deuten darauf hin, dass Megakonstellationen dieses Erlebnis erschweren und damit ein Stück Kulturgut bedrohen werden.

Seit Kurzem gibt es auch erste Studien darüber, wie sehr die Satelliten die Arbeit

von Profiastronomen erschweren werden. Eine davon stammt von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) und enthält keine guten Nachrichten: Die Megakonstellationen seien Besorgnis erregend, warnen die Wissenschaftler.

Wie von Tony Tyson befürchtet, werden vor allem auf Himmelsdurchmusterungen spezialisierte Instrumente wie das 8,4-Meter-Teleskop des Vera C. Rubin Observatory betroffen sein. Da es einen Himmelsausschnitt ins Visier nimmt, der siebenmal so groß wie der Vollmond ist, hat es oft auch einen Starlink-Satelliten im Bild. Und wegen der hohen Empfindlichkeit des Systems aus Teleskop und Detektor werden die hellen Punkte die Aufnahmen vermutlich stark stören. 30 Prozent der Bilder mit einer Belichtungszeit von mehr als 30 Sekunden könnten unbrauchbar sein, vermuten die IAU-Wissenschaftler.

Auch die Europäische Südsternwarte ESO hat eine wissenschaftliche Studie in Auftrag gegeben, deren Ergebnisse jüngst im Fachmagazin »Astronomy and Astrophysics« erschienen sind. Die Forscher schickten dafür 26000 Megakonstellations-Satelliten in einen virtuellen Him-



NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory/CTIO/AURA/DEVE (<https://nationalastro.org/news/starlink-satellites-imagined-from-ctio/>) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Über dem Gesichtsfeld des Vier-Meter-Teleskops »Blanco« des Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) verlaufen Spuren der Starlink-Satelliten dicht an dicht. Die Satelliten auf der 333 Sekunden langen Belichtung durch Clara Martínez-Vázquez (CTIO) und L. Clifton Johnson (Northwestern University, Illinois, USA) stammen vom zweiten Starlink-Start.



mel. Damit schätzten sie die Auswirkungen für Teleskope der ESO ab, die sich vor allem in der Atacamawüste in Chile befinden (siehe Bild oben).

Das Ergebnis lässt immerhin einen Teil der Astronomen aufatmen: Großteleskope wie das Very Large Telescope (VLT) oder das sich im Bau befindliche Extremely Large Telescope (ELT) haben bloß moderate Einschränkungen zu befürchten. In der Dämmerung könnten bis zu drei Prozent der Aufnahmen auf Grund vorüberziehender Satelliten wertlos sein; während der Nacht sinkt dieser Anteil.

Eine Frage des Sichtfelds

Dass Teleskope wie das VLT oder das ELT deutlich weniger betroffen sein werden als das Vera C. Rubin Observatory, erklären

die Experten mit dem Sichtfeld: Die ESO-Teleskope haben lediglich einen winzigen Himmelsausschnitt im Blick und vergrößern diesen sehr stark. Nur wenn sie viel Pech haben, zieht ein Satellit in diesem kleinen Bereich vorüber – entsprechend gering sind die Beeinträchtigungen.

Arno Riffeser von der Universitäts-Sternwarte München hält diese Einschätzung für plausibel. Auch er sieht die Megakonstellationen als Problem: Am 2,1-Meter-Teleskop des Wendelstein-Observatoriums der Münchner Sternwarte sehe man derzeit durchschnittlich alle 20 Minuten eine Satellitenspur, erzählt Riffeser. »Mit fünfmal so vielen Satelliten dank Starlink wird es deutlich schlimmer werden.«

Immerhin kann man versuchen, die Satellitenspuren durch intelligente Soft-

ware aus Bildern zu entfernen. Genau das haben Tony Tyson und seine Kollegen versucht. Aber: Es funktioniert nicht. Denn die Satelliten hinterlassen eine weitläufige »Geisterspur« in der Aufnahme – eine Linie ohne Informationen. Es ist also nicht damit getan, nur die Satellitenbahn aus den Bildern herauszurechnen.

DarkSat und Radiowellen

Ein Trost: »SpaceX hat uns kontaktiert, und sie wollen uns helfen«, sagt Tyson. So prüft das Unternehmen gerade, wie sich die Starlink-Satelliten dunkler machen lassen, so dass sie weniger Licht reflektieren. Allerdings kann man sie nicht einfach schwarz anmalen. Denn je weniger Licht ein Satellit zurückwirft, desto wärmer wird er – und läuft irgend-

Nach einer Studie der Europäischen Südsternwarte ESO beeinflussen die Satelliten von Megakonstellationen die professionelle astronomische Forschung. Die Simulation zeigt den Himmel am Paranal-Observatorium der ESO während der Morgendämmerung in Fisheye-Optik. Die Positionen von Satelliten sind rot und grün markiert. Die Studie berücksichtigte insgesamt 18 Satellitenkonstellationen, unter anderem von SpaceX, Amazon und OneWeb, mit insgesamt mehr als 26 000 künstlichen Satelliten. Bis zu etwa 100 Satelliten könnten in der Dämmerung mit dem bloßen Auge sichtbar sein. Die meisten der Satelliten würden eine Höhe von 30 Grad nicht überschreiten oder wären vergleichsweise dunkel (grün). Andere Satelliten im bevorzugten Beobachtungsbereich sind mit 3 bis 4 mag viel heller (rot). Gegen Mitternacht hin sinkt die Zahl der störenden Satelliten, insbesondere wenn sie in den Erd Schatten eintreten.

wann Gefahr, zu überhitzen. »Wir wollen ihnen eine realistische Zahl liefern, um wie viel Prozent sie die Helligkeit verringern müssten, damit wir damit umgehen können«, sagt Tyson. Aber noch wisse niemand, welches Maß an Abdunkelung nötig und für die Satellitenbetreiber auch tatsächlich realisierbar ist.

SpaceX hat im Januar 2020 zu Testzwecken einen dunkleren Satelliten namens DarkSat in den Himmel befördert. Jonathan McDowell und seine Kollegen beobachteten ihn mit Teleskopen, und er stellt fest: »Also, noch ist er nicht dunkler geworden. Er ist genauso hell wie die anderen Satelliten.« Wie das sein kann, ist unklar – auf eine Anfrage von »Spektrum.de« hat SpaceX nicht reagiert.

Bisher drehen sich Simulationen in erster Linie um Teleskope, die sichtbares Licht nachweisen. Große Sorgen machen sich aber auch Radioastronomen, die langwelligerer Strahlung nachspüren. Da dieser Teil des elektromagnetischen Spektrums auch von Kommunikationssatelliten verwendet wird, könnten Megakonstellationen hier ebenfalls Probleme verursachen, fürchten Astrophysiker.

Wenn Satelliten kollidieren

Fragen wirft noch ein anderer Aspekt des Megaprojekts auf: Was heißt es für die Raumfahrt, wenn statt knapp 6000 bald 25 000 Satelliten um Erdumlaufbahnen konkurrieren? Experten warnen seit

Jahren vor dem Problem des Weltraumschrotts, das Megakonstellationen massiv verschärfen könnten: Kollidieren zwei der Satelliten, lassen sie ein Trümmerfeld zurück, das eine Gefahr für andere Satelliten darstellt. Im schlimmsten Fall droht eine unkontrollierte Kettenreaktion, die viele Umlaufbahnen unbenutzbar machen könnte.

Wie gefährlich dieses Szenario ist, erlebte die Europäische Raumfahrtagentur ESA am 2. September 2019: Sie führte erstmals in ihrer Geschichte mit einem ihrer Satelliten ein Ausweichmanöver durch. Der Grund: Es drohte ein Zusammenstoß mit einem Starlink-Satelliten.

Ausgediente Satelliten entsorgen

Auch hier gibt es rein theoretisch eine technische Lösung: »Wenn man die abgeschalteten Satelliten mit hoher Zuverlässigkeit entsorgt, wird dieser Effekt unterdrückt«, sagt Manuel Metz, Experte für Weltraumschrott am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Eine einzelne Kollision löse noch keinen Kaskadeneffekt aus. Es sei allerdings ihm zufolge »sehr wichtig, dass die Betreiber die Satelliten am Ende der Lebensdauer entsorgen.« Unklar ist, ob SpaceX und andere Firmen das tatsächlich tun werden.

Dürfen Privatunternehmen den Weltraum eigenmächtig zumüllen?

Zumindest OneWeb schrieb sich den verantwortungsvollen Umgang mit seinem künftigen Weltraumschrott stärker auf die Fahnen als SpaceX – wobei die Starlinks in den niedrigen Erdumlaufbahnen früher oder später quasi automatisch in der Erdatmosphäre verglühen werden. So oder so dürfte auf Weltraumlagezentren ein erhöhter Arbeitsaufwand zukommen: Sie müssen koordinieren, dass Satelliten bei Kollisionsgefahr rechtzeitig ausweichen.

Seit Starlink für Schlagzeilen sorgt, steht auch immer wieder eine weit reichende Frage im Raum: Dürfen die das? Ist es in Ordnung, dass private Unternehmen wie SpaceX, OneWeb und Amazon sich in der Erdumlaufbahn breit machen, allen potenziellen Problemen zum Trotz?

Die Frage hat nicht nur eine moralische, sondern auch eine juristische Komponente: Eine im Januar 2020 erschienene Studie legt nahe, dass die Freisetzung der Satelliten möglicherweise rechtswidrig

war, zumindest nach US-amerikanischem Umweltrecht.

Ob das wirklich stimmt, ist allerdings umstritten, sagt Chris Johnson, ein Experte für Weltraumrecht von der Secure World Foundation. Denn nach geltendem Recht habe die US-Kommunikationsbehörde FCC, welche die Lizenzen für die Satelliten vergibt, alles richtig gemacht: »Sie hat sich an die Regeln gehalten.« So sei sie nicht dazu verpflichtet, zu fragen, inwiefern die Megakonstellationen Astronomen beeinflussen würden.

Relevant für die juristische Beurteilung ist daher aus Johnsons Sicht weniger das US-Umweltrecht als vielmehr der Weltraumvertrag von 1967. Laut Artikel II unterliegt der Weltraum einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper »keiner nationalen Aneignung durch Beanspruchung der Hoheitsgewalt, durch Benutzung oder Okkupation oder durch andere Mittel«. Das heißt nicht nur, dass der Mond eben »kein Ami« ist – egal, wie viele Fahnen die US-amerikanischen Astronauten bei ihrem Besuch aufgestellt haben –, sondern auch, dass die Erdumlaufbahnen, die ebenfalls als Weltraum gelten, niemandem gehören.

Staaten können Satellitenbetreibern Lizenzen für den Start und den Betrieb ih-

rer Satelliten verleihen – die Umlaufbahnen gehören diesen Satellitenbetreibern jedoch nicht. In der Praxis kann man bestimmte Orbits dennoch vereinnahmen, sagt Chris Johnson: »Wenn ein Betreiber eine Umlaufbahn so stark in Anspruch nimmt, dass andere Nutzer diese nicht selbst nutzen könnten, würde ein anderer Staat wahrscheinlich keine Lizenz für diese Umlaufbahn mehr erteilen.«

Massenware statt Qualitätssatelliten?

Auch Bernhard Schmidt-Tedd, Experte für Weltraumrecht am DLR, hält den Weltraumvertrag in der Frage der Megakonstellationen für ausschlaggebend: »Zum einen stellt sich die Frage nach der Güterabwägung zwischen Weltraumfreiheit, Artikel I, und der Rücksichtnahme auf die Interessen Dritter, Artikel IX. Je nach Konstellation könnte man von einer Verdrängungsnutzung sprechen.« Diese Argu-

mentation läuft mehr oder weniger darauf hinaus, dass die Erdumlaufbahnen allen und niemandem gehören, Megakonstellationen diese aber praktisch für sich allein beanspruchen – was nicht zusammenpasst. Über diese Flanke könnte ein Mammutprojekt wie Starlink also rechtlich angreifbar sein.

Und möglicherweise gibt es für Starlink-Kritiker noch einen weiteren juristischen Hebel: »Das Thema betrifft die Nachhaltigkeit der Weltraumnutzung«, sagt Schmidt-Tedd. Im Jahr 2019 wurden im Weltraumausschuss in Wien gerade die Nachhaltigkeitsrichtlinien zur Raumfahrt verabschiedet. Diese könnten für Unternehmen, die es mit der Entsorgung alter Satelliten nicht zu ernst nehmen, ein Problem werden: So dürften Megakonstellationen wegen ihrer großen Stückzahl oder aus ökonomischen Abwägungen weniger gut vor dem Start auf Fehler getestet werden als herkömmliche Satelliten – und entsprechend häufiger als manövrierfähiger Weltraumschrott enden.

Somit lautet die Antwort auf die Frage, wie rechtens Starlink ist: Ja, SpaceX darf das – zumindest bislang und solange all diese juristischen Fragen nicht geklärt sind. Es gibt bisher auch keine Regeln, welche die Helligkeit von Satelliten regulieren. Eine entsprechende Petition beim Deutschen Bundestag, die bis zum 17. März 2020 lief, weckte nur mäßiges bis gar kein Interesse.

Für Astronomen wie Tony Tyson mag das frustrierend sein, aber sie geben gewiss nicht auf. Jahrzehntlang hat Tyson auf das »erste Licht« des Vera C. Rubin Observatory hingearbeitet, und im Lauf dieses Jahres soll es endlich so weit sein. Man merkt ihm im Gespräch an, dass seine Vorfreude nun etwas getrübt ist, doch resigniert wirkt er nicht. »Wir haben das Projekt bewusst so geplant, dass wir das Unerwartete entdecken«, sagt Tyson. »Leider ist diese Sache nun Teil davon.«

FRANZISKA KONITZER studierte Physik und Astrophysik an der University of York in Großbritannien und ist in München als Journalistin tätig.

Literaturhinweis

Hattenbach, J.: Starlink-Satelliten – eine Pest am Himmel? *Sterne und Weltraum* 8/2019, S. 20–23

W I S wissenschaft
in die schulen!

Riesige Magnetfelder durchziehen die Andromedagalaxie

Mit dem 100-Meter-Radioteleskop bei Effelsberg fanden Bonner Astronomen in unserer Nachbargalaxie Magnetfelder, die um ihr Zentrum einen gigantischen Ring bilden.

Astronomen vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie haben mit dem 100-Meter-Radioteleskop bei Bad Münstereifel-Effelsberg die bisher umfangreichste und genaueste Vermessung der Magnetfelder in der Andromedagalaxie, einem Nachbarn unseres Milchstraßensystems, unternommen. Die Magnetfelder bilden einen breiten Ring in einem Abstand vom Galaxienkern zwischen 20000 und 50000 Lichtjahren. Die Feldrichtung verläuft dabei nahezu entlang des Rings, so wie es die Dynamotheorie der Feldentstehung vorhergesagt hat. Solche gigantischen Magnetfelder spielen bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien eine wichtige Rolle (siehe SuW 7-8/1989, S. 440 und SuW 9/2008, S. 34).

Die Andromedagalaxie, im Katalog von Charles Messier (1730–1817) die Nummer 31, kurz M31, ist mit nur 2,5 Millionen Lichtjahren Entfernung die nächstgelegene Spiralgalaxie und übertrifft das Milchstraßensystem an Größe und Gesamtmasse. M31 kann in klaren Nächten mit dem bloßen Auge gesehen werden und ist schon in alten arabischen Sternkarten als Nebelfleck zu finden. Mit modernen Teleskopen lassen sich ihre Sterne, ihr Gas und Staub mit hoher Präzision untersuchen. Im Bereich der Radiowellen eröffnet sich der Blick auf einen weiteren, oft vernachlässigten Bestandteil der Galaxien: die Magnetfelder.

In Galaxien entstehen ständig neue Sterne. Die massereichsten unter ihnen können als Supernova explodieren. Die hierbei angeregten Stoßwellen rasen durch das Gas des Raums zwischen den Sternen, den interstellaren Raum, und beschleunigen Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Wenn diese Teilchen die Erde erreichen, bilden sie einen Teil der kosmischen Strahlung. Geraten deren negativ geladenen Komponenten,

die Elektronen, in die Magnetfelder des interstellaren Raums, laufen sie um die Feldlinien und senden dabei Radiowellen aus, die Synchrotronstrahlung (siehe SuW-Special 2/2004, S. 50). Aus der Intensität der Radiostrahlung lässt sich die Magnetfeldstärke berechnen, und der gemessene Polarisationswinkel gibt uns die Orientierung des Felds in der Himmelsebene an. Wird zusätzlich noch die Änderung des Polarisationswinkels mit der Wellenlänge der Radiostrahlung gemessen, die Faraday-Rotation, so lässt sich auch die Feldrichtung entlang der Sichtlinie bestimmen – und somit ist die Feldstruktur im dreidimensionalen Raum bekannt.

Radiostrahlung von Messier 31

Die Lage am Nordhimmel und die enorme Winkelausdehnung von rund zwei Grad am Himmel macht M31 zu einem idealen Beobachtungsobjekt für das 100-Meter-Radioteleskop in Bad Münstereifel-Effelsberg, den weltweit zweitgrößten voll beweglichen Radiospiegel. Es wird vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) betrieben. Schon im Jahr 1972, kurz nach der Eröffnung des Teleskops, konnten Richard Wielebinski, damals Direktor am MPIfR, und Elly M. Berkhuijsen Radiowellen von M31 nachweisen. Es folgten Kartierungen bei Wellenlängen von 6 und 11 Zentimetern. Im Jahr 1977 fand Rainer Beck erstmals stark linear polarisierte Radiostrahlung von M31 im Rahmen seiner Doktorarbeit.

In den folgenden Jahrzehnten wurden die Empfangssysteme am Effelsberger Teleskop, das im kommenden Jahr seinen 50. Geburtstag feiert, immer weiter verbessert. Zwei Studenten am MPIfR, David Mulcahy und René Gießübel, führten im Rahmen einer Master- beziehungsweise einer Doktorarbeit von 2001 bis 2012 Kartierun-