

Unterstützung von GREAT Gastbeobachterprogrammen für SOFIA

— Schlussbericht zum Vorhaben 50 OK 2102 —

Prof. Dr. Bernd Klein

Max-Planck-Institut für Radioastronomie
Auf dem Hügel 69
53121 Bonn

bklein@mpifr-bonn.mpg.de

Bonn, 30. Juli 2024

I. KURZDARSTELLUNG

1.1 Aufgabenstellung

GREAT¹, das Heterodyn-Spektrometer für den Einsatz an Board von SOFIA, wurde für hochauflösende Beobachtungen im fern-infraroten Spektralbereich entwickelt, die von erdgebundenen Observatorien (Radioteleskopen) aufgrund des Wasserdampfes in der Erdatmosphäre nicht möglich sind. Die Instrumentenentwicklung wurde mit Eigenmitteln der beteiligten Institute und der unterstützenden Agenturen finanziert. Als sogenanntes *Principle Investigator* (PI) Instrument steht GREAT interessierten Astronomen in Zusammenarbeit mit dem Konsortium zur Verfügung.

Zum Zeitpunkt der ersten Antragsstellung vor rund 12 Jahren (Mai 2011) war GREAT in seiner Erstkonfiguration mit zwei *single-pixel* Empfängern L1 und L2 gerade erfolgreich in Betrieb gegangen. Der erste Wissenschaftsflug mit GREAT war am 1. April 2011.

Aufbauend auf diesem frühen Erfolg und der damit demonstrierten Terahertz-Technologie-Kompetenz, entschieden die das Konsortium tragenden Institute², mit wesentlicher Unterstützung und Teilfinanzierung durch das DLR, die Aufrüstung von GREAT zu upGREAT, mit zwei parallel betriebenen Heterodyn-Arrays. Mit upGREAT war es fortan möglich, mit jeweils 7 Pixeln die wichtigen Feinstrukturlinien CII bei 158 μm und OI bei 63 μm Wellenlänge gleichzeitig zu beobachten. Um die Empfindlichkeit weiter zu steigern, wurde bei dem niederfrequenten 7 Pixel-Array (LFA) jeweils zwei Detektoren pro Pixel implementiert, um beide orthogonalen Polarisationen gleichzeitig zu detektieren. Die upGREAT-Erweiterung wurde in den Jahren 2015 (LFA / 1,9 THz) und das hochfrequente Array (HFA / 4,7 THz) im Jahr 2017 in Betrieb genommen. Seit dieser Zeit wurde upGREAT auch der wissenschaftlichen Gemeinschaft angeboten.

Ab 2016 wurde – im Rahmen einer Doktor-Arbeit – eine weitere Erweiterung für GREAT aus MPIfR Hausmitteln entwickelt: 4GREAT. Während bei upGREAT die Effektivität von GREAT durch Pixel-Arrays gesteigert wurde, war die Intention bei 4GREAT, mehr Frequenzbänder gleichzeitig messen zu können. 4GREAT wurde mit 4 Mischern (2x SIS, 2x HEB) aufgebaut, die eine gleichzeitige Beobachtung der Frequenzbänder 490 – 630 GHz, 890 – 1100 GHz, 1,25 – 1,52 THz und 2,49 – 2,60 THz erlauben. Ermöglicht wurde dies durch neuartige Dichroic-Filter für den THz Frequenzbereich. Insbesondere das untere Frequenzband bei 500 GHz ist wissenschaftlich sehr interessant, weil dieses Band aufgrund der Atmosphäre mit Radioteleskopen vom Erdboden nicht beobachtet werden kann. 4GREAT wurde in zwei Schritten während der Neuseeland Kampagnen 2017 und 2018 erfolgreich in Betrieb genommen. Seit dieser Zeit stand auch 4GREAT der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung.

Gegenstand des hier beschriebenen Vorhabens ist die Unterstützung von GREAT-Gastbeobachterprogrammen im Zeitraum Januar 2021 bis September 2022 durch speziell geschultes Personal im Rahmen der Zuwendung FKZ 50 OK 2102. Diese Unterstützung umfasst die Planung und Vorbereitung der Beobachtung und deren Durchführung während der SOFIA-Flüge, sowie die anschließende Datenreduktion zu Level 2/3a-3b Daten und deren Ablieferung an das SMO.

1 GREAT: German REceiver for Astronomy at Terahertz Frequencies

2 Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR), Bonn, Institut für Astrophysik an der Universität zu Köln (KOSMA), Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen und DLR Institut für Optische Sensorsysteme, Berlin

1.2 Voraussetzungen

GREAT wird seit Aufnahme der regulären SOFIA-Beobachtungen, in Absprache mit dem SMO Direktor und in Kooperation mit dem GREAT Konsortium für *open-time* Projektvorschläge angeboten. Als Instrument der *Principal Investigator* (PI) Klasse wird GREAT dabei ausschließlich durch sachkundiges und hochqualifiziertes Personal des Konsortiums betrieben.

Nur durch diesen besonderen Betrieb war es bislang immer wieder möglich, dass Instrument dem technischen Fortschritt folgend, mit maximaler Performance (niedrigem Systemrauschen) weiterzuentwickeln. Diese Vorteile führen allerdings auch zu Kompromissen bei der Bedienung von GREAT. Anders als bei Instrumenten der sogenannten *facility* Klasse, kann GREAT nur sinnvoll von den Instrumenten-Wissenschaftlern betrieben werden, die bereits bei der Entwicklung des Instruments beteiligt waren. Ähnlich stellt sich die Situation bei der Beobachtung mit GREAT und der Datenkalibration dar: Auch hier sind Spezialisten gefordert, die alle Eigenschaften des Instruments genau verstehen, um Messungen mit GREAT effektiv durchzuführen und die Datenprodukte weiterzuverarbeiten.

Die Nachfrage nach Beobachtungszeit mit GREAT war immer hoch, thematisch sehr breit gestreut und weltweit. Hierzu konnten internationale Programme über NASA Zeit beantragt werden. In den Beobachtungszyklen 1 – 9 (2013 bis 2022) bediente GREAT gut ein Drittel aller Flüge (> 30 ab dem Jahr 2016). Alle zeitintensiven *joint impact* Projekte mit hoher Sichtbarkeit wurden mit GREAT geflogen. 2 / 3 aller GREAT Flugstunden dienen Projekten, deren Zeit per erfolgreichem *peer-review* Verfahren eingeworben wurde. Die hohe Nachfrage nach GREAT-Beobachtungszeit und unser eigener Anspruch, hochqualitative Daten (Level 3a und 3b, falls sinnvoll) zu liefern, war nur durch massiven Personaleinsatz von auf GREAT ausgebildeten Wissenschaftlern möglich. Besonders zu erwähnen sind die beiden SOFIA-Legacy-Programme FEEDBACK, HYGAL, die in den letzten drei SOFIA-Cycles erfolgreich durchgeführt wurden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Förderung im Rahmen der Zuwendung 50 OK 2102 umfasst – anders als bei früheren Förderungen – nur die Unterstützung von hochqualifiziertem Personal für den Betrieb der GREAT-Erweiterungen upGREAT und 4GREAT (siehe 1.1). Erweiterungen und Verbesserungen an dem GREAT Instrument wurden ausschließlich durch Haushaltsmittel der beteiligten Institute finanziert.

Im Rahmen der DLR-Förderung, im Gesamtumfang von 3.5 FTE (1.5 FTE Universität zu Köln, 1.5 FTE MPIfR und 0.5 FTE Universität Berlin), wurde sichergestellt, dass bereits hochqualifiziertes Personal im Projekt weiter gehalten werden konnte und keine neuen Mitarbeiter*innen gesucht und auf GREAT ausgebildet werden mussten. Dadurch ließen sich zu erwartende Übergabeprobleme umgehen.

Wie weiter oben bereits ausgeführt, wurde GREAT ständig an neue technologische Fortschritte angepasst. Das betrifft die Hardware (2017 / 2018 wurde 4GREAT in Betrieb genommen), aber auch die GREAT-Betriebssoftware, die Kalibrationsprogramme und die Monitor-Tools, um den gesicherten Betrieb von GREAT zu ermöglichen. Es war immer die Philosophie des GREAT-Teams, die Wissenschaftler bei diesen Entwicklungen von Beginn an einzubinden, auch bei den technischen Programmen und den Hardware-Erweiterungen. Nur durch diesen Ansatz war es möglich, auf Hard- und Software Probleme unmittelbar – auch noch während einer Beobachtung – angemessen zu reagieren, um eine optimale Datenqualität zu erzielen. Wie die Erfahrungen gezeigt haben, ist durch diese Philosophie kein einziger GREAT-Flug durch Instrument-Probleme ausgefallen (vgl. Tabelle 2).

Neben den Beobachtungen mit GREAT, gehört eine sorgfältige Planung der GREAT-Flüge ebenfalls mit zu den Aufgaben der Wissenschaftler. Dies umfasst die wissenschaftlich sinnvolle Zusammenstellung der Beobachtungsprojekte, die Programmierung und Anpassung der Beobachtungsskripte, die Tuning-Sessions vor den Flügen, um GREAT optimal in den atmosphärischen Fenstern zu betreiben, sowie die Datenkalibration und Nachbearbeitung nach den Flügen. Diese Aufgaben sind sorgfältig und zeitlich aufeinander abgestimmt, damit insbesondere bei Gastbeobachterprogrammen, die kalibrierten Daten-

produkte innerhalb einer 60 Tage-Frist (MoU mit dem SMO Direktor) an die Projektleiter verteilt werden können.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Entwicklung von GREAT über die letzten 15 Jahre. Die ursprünglichen *single-pixel* Detektoren L1, L2, Ma und H sind seit upGREAT (2015 / 2016) nicht mehr in Betrieb. Mit upGREAT wurde auch auf einen geschlossenen Kühlkreislauf mit Heliumkompressoren umgestellt, wodurch der Betrieb von GREAT erheblich vereinfacht wurde. Auch die Frequenzband-erweiterung 4GREAT verwendet die Heliumkompressoren zur Kühlung. Mit 4GREAT wurden erstmals bei GREAT, neben den sonst für sehr hohe Frequenzen üblichen Hot Electron Bolometer (HEB) Mischern, für 4G-1 und 4G-2 Superconductor Insulator Superconductor (SIS) Mischer eingesetzt. Diese haben gegenüber HEBs ein geringeres Eigenrauschen und bieten eine breitere Zwischenfrequenz-Bandbreite. 4GREAT kann mit upGREAT HFA kombiniert werden, wodurch 5 Frequenzen gleichzeitig gemessen werden können. Entsprechend komplex sind die Abstimmarbeiten von GREAT vor und während des Flugs, aber auch die Datenkontrolle bei den Beobachtungen. Auch hier hat sich wieder gezeigt, dass ein effektiver Betrieb von GREAT nur mit hochqualifizierten und auf GREAT trainiertem Personal möglich ist.

GREAT-Kanal		Frequenzband [THz]	Astronomische Linien	Trx [K] / IF-Bandbreite [GHz]
low-frequency	L1	1.26 – 1.52	[NII], CO Serie, OD, H ₂ D+	600 / 2.5
	L2	1.82 – 1.91	NH ₃ , OH, CO(16-15), [CII]	700 / 2.5
mid-frequency	Ma	2.49 – 2.56	(¹⁸ O)H(2Π _{3/2})	1500 / 2.0
high-frequency	H	4.74	[OI]	900 / 2.5
upGREAT	LFA	2x 7 [1.8 – 2.1]	NH ₃ , OH, CO Serie, [CII], [OI]	750 / 3.3
	HFA	7x [4.74]	[OI]	900 / 3.3
4GREAT	4G-1	0.49 – 0.63	[CI], CH, NH ₃ , H ₂ ¹⁸ O, CO	150 / 4.0 (SIS-Mischer)
	4G-2	0.89 – 1.10	CO, CH ⁺ , OH ⁺ , NH	300 / 4.0 (SIS-Mischer)
	4G-3	1.25 – 1.52	[NII], CO Serie, OD, SH, H ₂ D+	600 / 3.3
	4G-3	2.49 – 2.60	(¹⁸ O)H(2Π _{3/2})	1500 / 2.1

Tabelle 1: Die Entwicklung des GREAT-Spektrometers: GREAT wurde in den Jahren 2011 bis 2014 zunächst als single-pixel Empfänger betrieben, der mit flüssigem Helium gekühlt wurde. Mit upGREAT ab 2015 wurde der Empfänger auf 7 Pixel und Kühlmaschine umgestellt und das ursprüngliche GREAT außer Betrieb genommen. Die letzte Erweiterung 4GREAT wurde in den Jahren 2017 und 2018 in Betrieb genommen, um Beobachtungen in weiteren Frequenzbänder zu ermöglichen, die erdgebunden nicht gemessen werden können.

Die letzten technischen Veränderungen an GREAT wurden im Förderungszeitraum ab 2021, aber ohne Kostenbeteiligung vom DLR, vorgenommen. Mit finanzieller Unterstützung durch die NASA wurden in Zusammenarbeit mit der auf Hochfrequenzanwendungen spezialisierten Firma Virginia Diodes Inc (VDI) in Charlottesville, VA, USA, der Universität zu Köln und dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie, zwei neue LO-Systeme für upGREAT LFA (1,9 THz) entwickelt. Diese Entwicklung war nötig geworden, weil die bisherigen 1,9 THz LO-Ketten am Rande der technischen Machbarkeit betrieben werden mussten und dadurch frühzeitig an Leistung verlieren oder ganz ausfallen können. Auf Basis neuartiger Leistungsverstärker bis 300 GHz, konnte VDI neue LO-Ketten mit mehr Ausgangsleistung ent-

wickeln, die – anders als bei den vorherigen LO-Ketten – ohne spezielle Kühlmaßnahmen auskommen und einen erweiterten Frequenzbereich bedienen können. Insgesamt wurden zwei LO-Einheiten mit jeweils zwei 1,9 THz Oszillatorketten für zwei Polarisierungen entwickelt, aufgebaut, getestet und geliefert. Durch die frühzeitige Beendigung des SOFIA-Flugbetriebs im September 2022, konnte leider nur eine der beiden Ketten mit upGREAT geflogen werden.

1.3.1 Corona-Pandemie

Die SOFIA-Flüge im Bewilligungszeitraum waren noch erheblich von der weltweiten Corona-Pandemie und den allgemeinen Maßnahmen zur Eindämmung der Infektionswege betroffen. Deshalb wurden die Beobachtungskampagnen anders als üblich geplant, damit die wesentlichen Experten für GREAT an den Flügen teilnehmen konnten.

Die ersten Beobachtungsflüge fanden unmittelbar nach den Wartungsarbeiten am Flugzeug in Hamburg statt und wurden im Februar und März 2021 vom Flughafen Köln / Bonn durchgeführt. Beobachtungsflüge über Europa waren durch die Pandemie möglich geworden, weil der normale Personenflugverkehr fast vollständig eingestellt wurde. Obwohl die Kampagne durch die strengen Corona-Maßnahmen erheblich erschwert wurde, konnten die Beobachtungen weitgehend erfolgreich durchgeführt werden.

Wegen der Pandemie und den damit verbundenen Reiseverboten, war im gleichen Jahr kein *southern deployment* von Neuseeland möglich. Um trotzdem Quellen in der südliche Hemisphäre zu beobachten, entschied das SOFIA Projekt eine Kampagne von Tahiti durchzuführen. Leider zeigte sich schnell, dass die atmosphärischen Bedingungen durch den hohe Wasserdampfgehalt in der Äquatorregion, mit den Bedingungen in Neuseeland nicht vergleichbar war. Weiterhin musste die Tahiti-Kampagne auch vorzeitig abgebrochen werden, weil die Corona-Inzidenz auf der Insel dramatisch anstiegen und auch erste Corona-Fälle im SOFIA-Team auftraten.

Mit Sondergenehmigungen der Universität zu Köln und der Max-Planck-Gesellschaft sowie vorweg beantragten USA A1-Visa für das deutsche GREAT-Team, wurde im November 2021 eine GREAT-Kampagne von Palmdale aus durchgeführt. Trotz der weiteren strikten Corona-Maßnahmen und Corona-Fällen im SOFIA- und GREAT-Team, konnte diese Flugserie erfolgreich durchgeführt werden.

Die beiden Flugkampagnen im folgenden Jahr 2022 konnten dann wieder ohne weitere Corona-Maßnahmen regulär ausgeführt werden.

1.3.2 Unsichere Perspektiven und vorzeitige Einstellung des SOFIA-Flugbetriebs

Weil zu Beginn dieser Förderperiode im Januar 2021 noch überhaupt nicht absehbar war, ob das NASA / DRL-MoU nochmals über 2023 hinweg verlängert würde, haben sich die beteiligten PI-Institute darauf geeinigt, upGREAT / 4GREAT nicht weiter zu erweitern, weil völlig unklar war, ob diese zusätzlichen Entwicklungen überhaupt noch zum Einsatz bei SOFIA-Flügen kommen würden. So war ursprünglich geplant, auch das upGREAT HFA von 1x 7 Pixel auf 2x 7 Pixel zu erweitern. Durch diese Hardware-Erweiterung wäre es möglich gewesen – ähnlich wie bei dem LFA – mit 7 Pixeln in beiden orthogonalen Polarisierungsebenen zu beobachten, wodurch die HFA-Messungen doppelt so effektiv geworden wären. Diese HFA-Erweiterung hätte für die Universität zu Köln die Produktion von mindestens 7 hochempfindlichen HEB-Mixern für 4,7 THz bedeutet. Das MPIfR hätte den IF-Signalprozessor sowie das Fast-Fourier-Transform Spektrometer (FFTS) um 7 zusätzliche Einheiten erweitern müssen. Weiterhin hätte durch das DLR in Berlin und/oder die Universität zu Köln ein weiterer QCL-LO bereitgestellt werden müssen. Als realistische Entwicklungszeit inklusive Funktionstests und Integration in upGREAT waren ca. 3 Jahre geplant. Bei einer nicht sicheren Weiterführung des SOFIA-Projektes über 2023 hinaus, wäre diese teure Erweiterung ohne definitive Zusagen durch NASA / DLR nicht zu rechtfertigen gewesen. Zudem wären die erforderlichen Kosten durch die Universität zu Köln aufgrund des auslaufenden SFB 956 nicht finanzierbar gewesen. Am MPIfR haben sich in der gleichen Zeit die wis-

senschaftlichen Prioritäten hin zum APEX Teleskop verändert, womit das nötige Personal aus Hausmitteln nicht mehr für eine HFA-Erweiterung zur Verfügung gestanden hätte. Die vorzeitige Einstellung der SOFIA-Flüge im September 2022 haben letztlich nochmals gezeigt, dass eine weitere Effizienzsteigerung von upGREAT zwar technisch möglich gewesen wäre, aber auch niemals zum Einsatz gekommen wäre. Die Entscheidung upGREAT nicht zu erweitern war daher richtig getroffen worden.

II. EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Durchführung der GREAT Gastbeobachterprogramme

In der hier beschriebenen Förderperiode vom Januar 2021 bis zum Ende des aktiven SOFIA-Betriebs im September 2022 wurden insgesamt 92 GREAT-Flüge vollständig wissenschaftlich vorbereitet (siehe Tabelle 2). Letztlich konnten jedoch nur 53 Flüge mit GREAT an Board von SOFIA durchgeführt werden: 38 Gastbeobachterflüge (*Open Time*) und 15 Konsortiumsflüge (*Guaranteed Time*). Die hohe Ausfallrate an Flügen erklärt sich durch die Corona-Pandemie (9 ausgefallene Flüge in Tahiti) und schließlich durch die Beschädigung am Flugzeug in Neuseeland (14 ausgefallene Flüge). Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass es in dem Förderzeitraum zu keiner Flugabsage aufgrund von Problemen mit dem GREAT-Instrument gekommen ist. Aufgetretene technische Schwierigkeiten mit dem Instrument konnte in allen Fällen vor Flugbeginn behoben werden.

Die nachfolgende Tabelle listet die geplanten und durchgeführten Flüge von 2021 – 2022 auf.

Zeitraum	Cycle	Ort:	Geplante Flüge	Durchgeführte Flüge	GT	OT
Feb 2021	8	CGN	22	15	3	12
Juli 2021	8	PMD	2	1	0	1
Juli 2021	8	Tahiti	22	13	3	10
Nov 2021	9	PMD	11	8	3	5
April 2021	9	PMD	15	10	4	6
Juli 2021	9	NZ	20	6	2	4
Summe:			92	53	15	38

Tabelle 2: Vorbereitete und durchgeführte SOFIA-Flüge mit GREAT. (GT: *Guaranteed Time*, OT: *Open Time*)

Die Unterstützung der Gastbeobachtungsprogramme umfasste wie üblich die Planung der Beobachtungen in Zusammenarbeit mit den Projektleitern der OT-Projekte und den SMO-Mitarbeitern, die Erstellung der Beobachtungsskripte und deren anschließende Überprüfung im Beobachtungssimulator, alles in Vorbereitung auf die Beobachtungskampagnen. Während der Kampagnen erfolgte dann die Optimierung des Tunings des GREAT-Empfängers, um stabile Arbeitspunkte zu finden sowie die Durchführung der Beobachtungen im Flugzeug. Auch für die abgesagten Flüge war die volle Aktivität in der Vorbereitung notwendig: Erstellung der Flugpläne durch das SMO Personal in Absprache mit dem GREAT-Team, die detaillierte Planung der Beobachtungsprogramme für GREAT sowie die Erstel-

lung der Tuning-Tabellen für alle Flüge während der Vorbereitungszeit der Flugkampagne vor Ort (Köln, Palmdale, Tahiti, Neuseeland).

Die wissenschaftlichen Daten aller Flüge wurden an das SOFIA Datenarchiv übergeben. Wie mit SMO vereinbart, wurden ebenfalls alle *Open-Time*-Daten innerhalb von 60 Tagen nach Abschluss der jeweiligen Flugkampagne als reduzierte *Level-2* und *Level-3a/3b*-Daten (je nach wissenschaftlichem Programm) zur Einstellung in das SOFIA-Datenarchiv geliefert.

Mit der Einstellung des SOFIA-Programms durch die NASA und das DLR war Cycle 9 der letzte geflogene SOFIA-Beobachtungszyklus. Dieser Beobachtungszyklus musste während der Neuseeland-Kampagne vorzeitig beendet werden, weil das Flugzeug während der Kampagne am Boden durch die von starkem Wind bewegte Zugangstreppe erheblich beschädigt wurde. Dadurch fielen die letzten 14 Flüge mit GREAT aus, in denen der Abschluss der beiden mit GREAT durchgeführten Legacy-Programme FEEDBACK und HyGAL mit hoher Priorität geplant waren. Aus diesem Grund konnten die beiden Legacy-Programme leider nur zu 90% bzw. 85% abgeschlossen werden.

2.1.2 Rückführung von GREAT und der Laborausstattung von Palmdale nach Deutschland

Aufgrund der vorzeitigen Einstellung der SOFIA-Flüge durch NASA und DLR sowie durch die Beschädigung von SOFIA bei der Neuseeland-Kampagne im Juli 2022, wurden keine weiteren Beobachtungsflüge mehr mit GREAT durchgeführt. Deshalb wurde das technisch / wissenschaftliche Personal, das ursprünglich für die Entwicklung und den Betrieb von GREAT von den PI-Instituten zur Verfügung gestellt wurde, für die Rückführung von GREAT eingesetzt. Zunächst wurde GREAT in Neuseeland verpackt und nach Palmdale in die USA transportiert (August 2022). Im Herbst / Winter 2022 wurde in Palmdale das GREAT-Labor aufgelöst und GREAT sowie die deutsche Laborausstattung für die Versendung per Schiff nach Deutschland vorbereitet. Parallel dazu wurden die Unterlagen und Verpackungslisten aktualisiert sowie die Zollbefreiungen für die Überführung zurück nach Deutschland erstellt. Im Frühjahr 2023 wurde der Seetransport nach Deutschland durchgeführt und die Sendung am MPIfR in Bonn zunächst eingelagert und einzelne Komponenten an die beteiligten PI-Institute zurückgeführt. Die Kosten für die Rückführung von GREAT und die Laborausstattung zurück nach Bonn (ca. 5 Tonnen Material) wurde durch eine Mittelumwidmung durch das DLR finanziert.

2.1.3 Einstellung von weiteren experimentellen Entwicklungen für GREAT

Durch die vorzeitige Einstellung der SOFIA-Flüge, wurden auch laufende experimentelle technische Entwicklungen, überwiegend an der Universität zu Köln, beendet bzw. bei laufenden Doktorarbeiten nur soweit weiterverfolgt, wie es für den erfolgreichen Abschluss der Arbeiten nötig war.

Ein wichtiges wissenschaftliches Anliegen des GREAT-Teams war es, durch eine Frequenzerweiterung von 4GREAT um einen $28,22 \mu\text{m}$ ($10,623 \text{ THz}$) Kanal zum ersten mal vollständig geschwindigkeitsaufgelöste Beobachtungen der Grundzustandslinie des häufigsten Moleküls im Weltraum, H_2 , zu ermöglichen, nämlich die des Quadrupolübergangs $J = 2 \rightarrow 0$. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich ein für dieses Experiment nötiger QCL-Lokaloszillator entwickelt, der genügend Ausgangsleistung liefert, um einen *open-structure* HEB-Mischer zu pumpen. Weil keine Aussicht mehr bestand, dieses Experiment mit SOFIA zu fliegen, wurde das Projekt nach dem Abschluss der Doktorarbeit eingestellt. Selbst Laborexperimente konnten nach dem Weggang der beteiligten Personen aus dem Projekt nicht mehr durchgeführt werden.

Bei einer weiteren technischen Entwicklung sollten QCL-Lokaloszillatoren dahingehend optimiert werden, um sie abstimmbare einzustellen. Hierfür wurde ein *Frequency-Lock* des $4,7 \text{ THz}$ QCL-LO erfolgreich im Labor demonstriert. Auch diese Arbeit wurde nach dem Ende der SOFIA-Flüge eingestellt.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit

2.2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Bei der hier beschriebenen Förderung handelt es sich um grundlagenorientierte Forschung und Instrumentenentwicklung, bei der unmittelbare wirtschaftliche Verwertbarkeit nicht anzunehmen ist. Das trifft ebenso auf die Durchführung des Beobachtungsbetriebs mit SOFIA zu.

2.2.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

GREAT bedient seit der Inbetriebnahme ca. 1/3 aller wissenschaftlichen SOFIA-Flüge. Das waren in den letzten Jahren (Corona bereinigt) 30 – 40 Flüge pro Jahr. Die hohe Nachfrage der astronomischen Gemeinschaft nach hochauflösender Spektroskopie mit GREAT ist eine Folge der ständigen technologischen Weiterentwicklung des Instruments. Bei der upGREAT Erweiterungen ging es vornehmlich darum, die Effizienz von GREAT durch Multibeam-Technologie zu verbessern. Viele Beobachtungen, die auf einer Durchmusterung eines Himmelbereichs basieren, sind erst mit upGREAT möglich geworden, weil das ursprüngliche GREAT, als *single-pixel* Spektrometer, für diese Projekte unrealistisch viel Flugzeit benötigt hätte. Mit der 4GREAT-Erweiterung um vier zusätzliche Frequenzbänder, können in Kombination mit dem upGREAT HFA (4,7 THz) 5 Wellenlängenbereich gleichzeitig gemessen werden. Dies hat zu neuen astronomischen Möglichkeiten geführt, die wiederum neue Beobachtungsanträge motiviert haben.

Wegen der unklaren Zukunft von SOFIA, aber auch wegen Veränderungen an der Universität zu Köln (Pensionierung von J. Stutzki im September 2022) und am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Pensionierung von K. Menten im Oktober 2025), sowie der unklaren Finanzierung für GREAT, wurden nur noch minimale Erweiterungen und Verbesserungen an GREAT im letzten Förderzeitraum durchgeführt. Dazu gehören neue Lokal-Oszillator (LO) Ketten für das LFA bei 1,9 THz von der Firma VDI, basierend auf neuester THz-Technologie, weil die vorherigen LO-Ketten gealtert waren und zunehmend anfällig wurden. Zudem bieten die neuen LO-Ketten einen erweiterten Frequenzbereich, der für einige Beobachtungsprojekte sehr gewünscht war. Leider hat die frühzeitige Einstellung der SOFIA-Beobachtungsflüge dazu geführt, dass diese Projekte nicht mehr gemessen werden konnten.

2.2.3 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die für GREAT erforschten Terahertz-Technologien entwickeln sich rasant weiter, ganz wesentlich getragen durch die Forschungsaktivitäten der im Konsortium beteiligten Institute. Der 10 THz Kanal (siehe 2.1.3) ist ein gutes Beispiel dafür. Die bislang höchste Frequenz für im Einsatz befindliche HEB-Mischer liegt bei 4,7 THz (upGREAT / HFA). Der geplante 10 THz Kanal zielte darauf, diese schon beachtlich hohe Frequenz noch mal zu verdoppeln. Die durch den 10 THz Kanal erweiterten astronomischen Beobachtungsoptionen ermöglichen interessante Projekte (z.B. H₂), die bislang technisch nicht möglich waren und hätten die Nachfrage nach GREAT-Beobachtungszeit nochmals erhöht.

Bei einem längeren Betrieb von GREAT (siehe auch 2.2.2), hätte das upGREAT / HFA von derzeit 7 Pixel auf 2x 7 Pixel erweitert werden können. Bei diesem Konzept würden die 7 Pixel bei 4,7 THz dann beide Polarisations Ebenen erfassen, wodurch sich die Empfindlichkeit des HFA maßgeblich steigern ließe. Diese Erweiterung, die auch eine Aufstockung der Bias-Elektronik, der IF-Signalverarbeitung und auch der digitalen FFT-Spektrometer erfordert, wäre ggf. auf einer Zeitskala von 2-3 Jahren realisierbar gewesen. Sie hätte GREAT hinsichtlich der Effizienz nochmals verbessert und weitere Beobachtungsprojekte aufgrund der höheren Empfindlichkeit bei 4,7 THz motiviert.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von GREAT hat technologische Ergebnisse erzielt, die zu Beginn des Projekts noch nicht absehbar waren. Nie zuvor sind mit 7 Beams bei 4,7 THz hochaufgelöste spektroskopische Beobachtungen gemacht worden. Einige dieser Techniken werden an den von den PI-Instituten betriebenen Teleskopen (APEX und CCAT in Chile) weiterverwendet werden können.

2.3 Veröffentlichungen

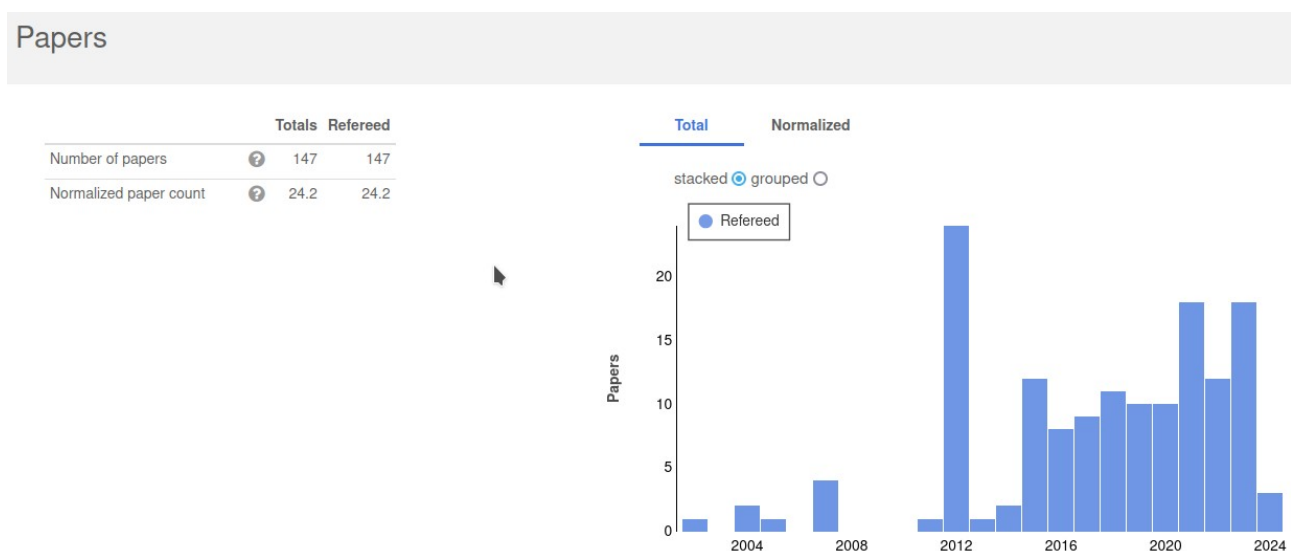
Das GREAT-Heterodyne-Spektrometer und die upGREAT-Erweiterung wurde in mehreren Publikationen und Konferenzbeiträgen vorgestellt und beschrieben. Hervorzuheben ist dabei insbesondere unsere Publikation von 2018, „*First Supra-THz Heterodyne Array Receivers for Astronomy with the SOFIA Observatory*“ von C. Risacher, et al., die mit dem „2018 IEEE Best Paper Award“ prämiert wurde. Die Ergebnisse der upGREAT Inbetriebnahme wurden bei *Astronomy & Astrophysics* (C. Risacher, et al., *A&A*, 595, 34, 2016) veröffentlicht.

Die 4GREAT-Erweiterung für die vier Frequenzbänder 490 – 630 GHz, 890 – 1100 GHz, 1,25 – 1,52 THz und 2,49 – 2,60 THz, wurde im Rahmen der erfolgreichen Doktorarbeit³ von Carlos Durán entwickelt und bei IEEE publiziert: „*4GREAT – A Four-Color Receiver for High-Resolution Airborne Terahertz Spectroscopy*“, *IEEE Terahertz Science and Technology* (Volume: 11, Issue: 2, 2021).

Am Deutschen SOFIA Institut in Stuttgart finden aktuell die Vorbereitungen für ein Buch (Editor Alfred Krabbe) über das SOFIA-Projekt statt. Es wird neben vielen wissenschaftliche Zielen und Projekten von SOFIA auch zwei Artikel über GREAT enthalten. Davon beschreibt eins die instrumentellen und technologischen Entwicklungen von GREAT (Autoren: R. Güsten, B. Klein, J. Stutzki und H.W. Hübers) und das zweite Kapitel fasst die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse von GREAT zusammen (Autoren: J. Stutzki, R. Güsten, B. Klein und H.W. Hübers).

Bis heute (Stand 30. Juli 2024) wurden fast 150 wissenschaftliche Beiträge, basierend auf mit GREAT gemessenen Daten veröffentlicht (u.a. in *Nature*, *Science*, *Astronomy & Astrophysics* sowie im *Astrophysical Journal*). Zudem wurden 16 technisch-wissenschaftliche Paper, u.a. bei IEEE, über das GREAT-Instrument und die GREAT-Erweiterungen veröffentlicht. Eine Analyse der NASA / ADS metrics zeigt eine steigende Publikationsentwicklung mit ca. 10 – 15 Veröffentlichungen pro Jahr und ansteigenden Indizes. Es ist anzunehmen, dass sich aus den Archivdaten von GREAT noch mindestens 50 weitere Publikationen in den kommenden Jahren erstellen lassen.

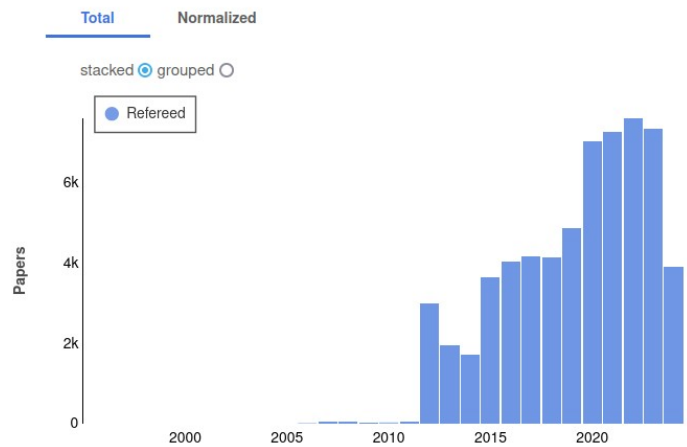
Eine Liste aller Veröffentlichungen mit SOFIA / GREAT Bezug ist diesem Bericht angefügt.



³ „Terahertz Airborne Astronomy using a Four Detector High Resolution Spectrometer: 4GREAT“, Dissertation, 2018, <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/7683>

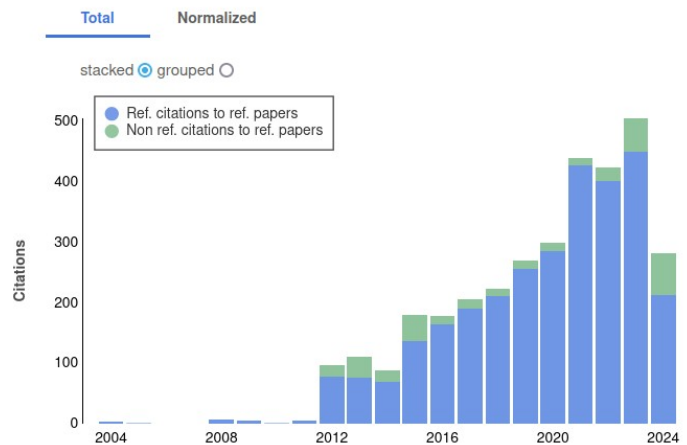
Reads

	Totals	Refereed
Total number of reads	60898	60898
Average number of reads	414.3	414.3
Median number of reads	397	397
Total number of downloads	30641	30641
Average number of downloads	208.4	208.4
Median number of downloads	201	201



Citations

	Totals	Refereed
Number of citing papers	1842	1842
Total citations	3314	3314
Number of self-citations	741	741
Average citations	22.5	22.5
Median citations	13	13
Normalized citations	381.6	381.6
Refereed citations	2971	2971
Average refereed citations	20.2	20.2
Median refereed citations	12	12
Normalized refereed citations	341.8	341.8



Indices

	Totals	Refereed
h-index	30	30
m-index	1.3	1.3
g-index	50	50
i10-index	92	92
i100-index	4	4
tori index	8.0	8.0
riq index	122	122
read10-index	715.6	715.6

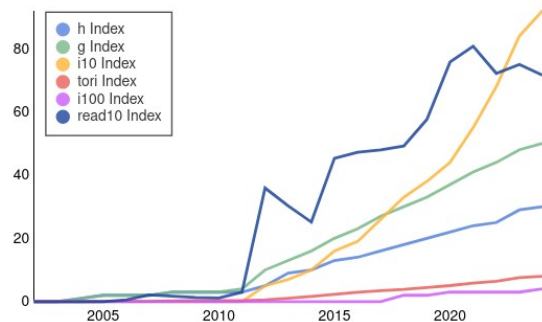


Abbildung 1: NASA / ADS Metrics, Stand 30.07.2024

Wissenschaftliche Veröffentlichungen in begutachteten Fachzeitschriften, die auf Beobachtungen mit GREAT basieren

Projektleiter und Erstautor	Titel des wissenschaftlichen Beitrags	Journal
H. Wiesemeyer	Revisiting Jupiter's deuterium fraction in the rotational ground-state line of HD at high spectral resolution	A&A in press (2024)
J.M. Jackson	Absorption and Self-Absorption of [C II] and [O I] Far Infrared Lines Towards a Bright Bubble in the Nessie Infrared Dark Cloud	ApJ 965, 187 (2024)
N.-D. Tung	Gas kinematics and dynamics of Carina Pillars: A case study of G287.76-0.87	ApJ 969, 113 (2024)
N. Schneider	First detection of the CII 158 μ m line in the intermediate velocity cloud Draco	A&A 686, 109 (2024)
T.D. Hoang	Velocity-resolved high-J CO emission from massive star-forming clumps	A&A 679, 121 (2023)
M. Cordiner	Author's Reply to Comment by Greaves et al. on "Phosphine in the Venusian Atmosphere: A Strict Upper Limit From SOFIA GREAT Observations"	GeophResL 50, e2023GL106136 (2023)
J.S. Greaves	Comment on "Phosphine in the Venusian Atmosphere: A Strict Upper Limit From SOFIA GREAT Observations" by Cordiner et al.	GeophResL 50, e2023GL103539 (2023)
M. Tiwari	Identifying physical structures in our Galaxy with Gaussian Mixture Models: An unsupervised machine learning technique	ApJ 958, 136 (2023)
R.L. Karim	SOFIA FEEDBACK Survey: The Pillars of Creation in [C II] and Molecular Lines	AJ 166, 240 (2023)
R. Levy	[CII] Spectral Mapping of the Galactic Wind and Starbursting Disk of M82 with SOFIA	ApJ 958, 109 (2023)
H.W. Hübers	Direct detection of atomic oxygen on the dayside and nightside of Venus	NatCom 14, 6812 (2023)
B. Mookerjee	Constraining the geometry of the reflection nebula NGC 2023 with [O I]: emission & absorption	MNRAS 525, 5468 (2023)
M. Caputo	Physics and Chemistry of Radiation Driven Cloud Evolution. [C II] Kinematics of IC 59, and IC 63	ApJ 950, 140 (2023)
M. Jesty	[C I] and [C II] emission in the circumstellar envelope of IRC +10216 I. Observational data and NLTE modeling of the [C I] emission	A&A 675, 139 (2023)
L. Bonne	Unveiling the formation of the massive DR21 ridge	ApJ 951, 39 (2023)
N. Schneider	Ionized carbon as a tracer of the assembly of interstellar clouds	NatAstr 7, 546 (2023)
A.E. Rubinstein	HOPS 361-C's Jet Decelerating and Precessing Through NGC 2071 IR	ApJ 948, 39 (2023)
Le-N. Tram	SOFIA Observations of 30 Doradus. II. Magnetic Fields and Large-scale Gas Kinematics	ApJ 946, 8 (2023)
N. Fuda	Modeling CO Line Profiles in Shocks of W28 and IC 443	ApJ 944, 17 (2023)
W.-J. Kim	HyGAL: Characterizing the Galactic ISM with observations of hydrides and other small molecules. II. The absorption line survey with the IRAM 30 m telescope	A&A 670, 111 (2023)
D. Lis	Atomic oxygen abundance toward Sagittarius B2	A&A 669, L15 (2023)
H. Wiesemeyer	First detection of the atomic ^{18}O isotope in the mesosphere and lower thermosphere of Earth	Phys Rev Res. 5, 013072 (2023)
M. Heyer	Searching for converging flows of atomic gas onto a molecular cloud	ApJ 941, 62 (2022)
M. Cordiner	Phosphine in the Venusian Atmosphere: A Strict Upper Limit from SOFIA GREAT Observations	GeophResL 49, e2022GL101055 (2022)
M. Tiwari	SOFIA FEEDBACK Survey: PDR Diagnostics of Stellar Feedback in Different Regions of RCW 49	AJ 164, 150 (2022)

L. Bonne	The SOFIA FEEDBACK Legacy Survey Dynamics and Mass Ejection in the Bipolar H II Region RCW 36	ApJ 935, 171 (2022)
Ü. Kavak	Dents in the Veil: protostellar feedback in Orion	A&A 663, 117 (2022)
Ü. Kavak	Breaking Orion's Veil with fossil outflows	A&A 660, 109 (2022)
A.M. Jacob	HyGAL: Characterizing the Galactic ISM with observations of hydrides and other small molecules — I. Survey description and a first look toward W3(OH), W3 IRS5 and NGC 7538 IRS1	ApJ 930, 141 (2022)
H. Beuther	FEEDBACK from the NGC7538 HII region	A&A 659, 77 (2022)
S. Kabanovic	Self-absorption in [C II], ^{12}CO , and H I in RCW120. Building up a geometrical and physical model of the region	A&A 659, 36 (2022)
W.D. Reach	Ionized carbon around IRC+10216	ApJ 926, 69 (2022)
Y.-L. Yang	Atomic Shocks in the Outflow of L1551 IRS5 Identified with SOFIA-upGREAT Observations of [O I]	ApJ 925, 93 (2022)
T. Csengeri	SOFIA/GREAT observations of OD and OH rotational lines towards high-mass star forming regions	A&A 658, 193 (2022)
G. Harper	SOFIA upGREAT/FIFI-LS Emission-line Observations of Betelgeuse during the Great Dimming of 2019/2020	AJ 162, 246 (2021)
A.I. Harris	SOFIA-upGREAT Imaging Spectroscopy of the [C II] 158 μm Fine-structure Line of the Sgr B Region in the Galactic Center	ApJ 921, 33 (2021)
N. Schneider	Globules and pillars in Cygnus X. III. Herschel and upGREAT/SOFIA far-infrared spectroscopy of the globule IRAS 20319+3958 in Cygnus X	A&A 653, 108 (2021)
R. Higgins	Observation and calibration strategies for large-scale multi-beam velocity-resolved mapping of the [CII] emission in the Orion molecular cloud	A&A 652, 77 (2021)
D.A. Neufeld	The chemistry of chlorine-bearing species in the diffuse interstellar medium, and new SOFIA/GREAT observations of HCl^+	ApJ 917, 104 (2021)
P.F. Goldsmith	Interstellar Cloud Conditions Based on 63 μm [O I] Emission and Absorption in W3	ApJ 916, 6 (2021)
W.D. Langer	The dense warm ionized medium in the inner Galaxy	A&A 651, 59(2021)
E. Tarantino	Characterizing the Multi-Phase Origin of [CII] Emission in M101 and NGC 6946 with Velocity Resolved Spectroscopy	ApJ 915, 92 (2021)
M. Tiwari	SOFIA FEEDBACK survey: exploring the dynamics of the stellar wind driven shell of RCW 49	ApJ 914, 117 (2021)
M. Luisi	Stellar feedback and triggered star formation in the prototypical bubble RWC 120	Sci. Adv. 7, eabe9511 (2021)
A.M. Jacob	The CH radical at radio wavelengths: Revisiting emission in the 3.3 GHz ground state lines	A&A 650, 133 (2021)
H. Richter	Direct measurements of atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere using terahertz heterodyne spectroscopy	Communications Earth & Env 2, 19 (2021)
B. Mookerjee	The distribution of ionized, atomic and PDR gas around S1 in Rho Ophiuchus	A&A 648, 40 (2021)
O. Nayak	Stellar Feedback on the Earliest Stage of Massive Star Formation	ApJ 907, 106 (2021)
J.R. Goicoechea	Bottlenecks to interstellar sulfur chemistry. Sulfur-bearing hydrides in UV-illuminated gas and grains	A&A 647, 10 (2021)
D.A. Neufeld	Terahertz Water Masers: II. Further SOFIA/GREAT Detections toward Circumstellar Outflows, and a Multitransition Analysis	ApJ 907, 42 (2020)
G. Sandell	NGC7538 IRS1 - an O star driving an ionized jet and giant N-S outflow	ApJ 904, 139 (2020)
A.M. Jacob	Extending the view of ArH^+ chemistry in diffuse clouds	A&A 643, 91 (2020)
L. Bonne	Dense gas formation in the Musca filament due to the dissipation of a supersonic converging flow	A&A 641, 17 (2020)
M.A. Siebert	A Search for Light Hydrides in the Envelopes of Evolved Stars	ApJ 901, 22 (2020)

J.L. Pineda	A SOFIA Survey of [CII] in the galaxy M51 II. [CII] and CO kinematics across spiral arms	ApJ 900, 132 (2020)
M.S. Kirsanova	The PDR structure and kinematics around the compact H II regions S235 A and S235 C with [C II], [¹³ C II], [O I] and HCO ⁺ line profiles	MNRAS 497, 2651 (2020)
W. Lim	Star cluster formation in Orion A	PASJ 73, S239 (2021)
N. Schneider	FEEDBACK: a SOFIA legacy program to study stellar feedback in regions of massive star formation	PASP 132, 104301 (2020)
A.M. Jacob	First detection of ¹³ CH in the interstellar medium	A&A 640, 125 (2020)
C.H.M. Pabst	Expanding bubbles in Orion A: [C II] observations of M 42, M 43, and NGC 1977	A&A 639, 2 (2020)
J.R. Goicoechea	Molecular globules in the Veil bubble of Orion. IRAM 30 m ¹² CO, ¹³ CO, and C ¹⁸ O (2-1) maps of Orion A	A&A 639, 1 (2020)
D.A. Neufeld	Detection of Vibrational Emissions from the Helium Hydride Ion (HeH ⁺) in the PN NGC7027	ApJ 894, 37 (2020)
C. Guevara	[CII] 158 μm self-absorption and optical depth effects	A&A 636, 16 (2020)
T.F. Giesen	First detection of the carbon chain molecules ¹³ CCC and C ¹³ CC towards SgrB2(M)	A&A 633, 120 (2020)
A.M. Jacob	Fingerprinting the effects of hyperfine structure on CH and OH far infrared spectra using Wiener filter deconvolution	A&A 632, 60 (2020)
V. Lebouteiller	Physical conditions in the gas phases of the giant H II region LMC-N 11. II. Origin of [C II] and fraction of CO-dark gas	A&A 632, L106 (2019)
Y. Okada	First detection of [¹³ CII] in the Large Magellanic Cloud	A&A 631, L12 (2019)
J.L. Pineda	Electron Densities and Nitrogen Abundances in Ionized Gas Derived using [NII] Fine-structure and Hydrogen Recombination Lines	ApJ 886, 1 (2019)
B. Mookerjea	Opening the Treasure Chest in Carina	A&A 626, 131 (2019)
D.C. Lis	Terrestrial deuterium-to-hydrogen ratio in water in hyperactive comets	A&A 625, L5 (2019)
R. Güsten	Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH ⁺	Nature 568, 357 (2019)
C. Pabst	Disruption of the Orion molecular core 1 by wind from the massive star θ ¹ Orionis C	Nature 565, 618 (2019)
Y. Okada	Velocity profiles of [CII], [CI], CO and [OI] and physical conditions in four star-forming regions in the Large Magellanic Cloud	A&A 621, 62 (2019)
K. Ennico	An Overview of the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy Since Full Operation Capability	JAI 7, 1840012 (2018)
J. Pineda	A SOFIA Survey of [C II] in the Galaxy M51. I. [C II] as a Tracer of Star Formation	ApJ 869, L30 (2018)
J.P. Pérez-Beaupuits	A Thorough view of the nuclear region of NGC 253 combined Herschel, SOFIA and APEX dataset	ApJ 860, 23 (2018)
H. Andrews	Whipping IC 63/IC 59	A&A 619, 170 (2018)
G. Sandell	Velocity resolved [OI] 63 microns emission in the HD 50138 circumstellar disk	ApJ 864, 104 (2018)
W. Langer	The nature of molecular cloud boundary layers from SOFIA [OI] observations	A&A 617, 94 (2018)
N. Schneider	Anatomy of the massive star-forming region S106	A&A 617, 45 (2018)
B. Mookerjea	C ⁺ distribution around S1 in ρ Ophiuchi	A&A 616, 31 (2018)
M. Tiwari	Unveiling the remarkable photo dissociation region in M8	A&A 615, 158 (2018)
T.G. Bisbas	The inception of Star Cluster Formation Revealed by [CII] Emission Around an Infrared Dark Cloud	MNRAS 478, 54 (2018)
J. Bally	Kinematics of the Horsehead Nebula and IC 434 Ionization Front in CO and C ⁺	AJ 155, 80 (2018)
P.F. Goldsmith	Velocity-resolved [CII] Emission from Cold Diffuse Clouds in the interstellar Medium	ApJ 856, 96 (2018)
K.E. Jameson	First Results from the Herschel and ALMA Spectroscopic Surveys of the SMC: The Relationship between [CII]-bright Gas and CO-bright Gas at low Metallicity	ApJ 853 111 (2018)

H. Wiesemeyer	Unveiling the chemistry of interstellar CH. Spectroscopy of the 2 THz N = 2–1 ground state line	A&A 612, 37 (2018)
S.A. Levshakov	[C I], [C II] and CO emission lines as a probe for α variations at low and high redshifts	MNRAS 471, 2143 (2017)
W.D. Langer	Ionized gas in the Scutum spiral arm as traced in [N II] and [C II]	A&A 607, 59 (2017)
F. Herpin	First detection of a THz water maser in NGC 7538-IRS1 with SOFIA and new 22 GHz e-MERLIN	A&A 606, 52 (2017)
C.H.M. Pabst	[C II] emission from L1630 in the Orion B molecular Cloud	A&A 606, 29 (2017)
D.A. Neufeld	SOFIA/GREAT Discovery of Terahertz Water Masers	ApJ 843, 94 (2017)
A. Gusdorf	Nature of shocks revealed by SOFIA OI observations in the Cepheus E protostellar outflow	A&A 602, 8 (2017)
J. Harju	Detection of Interstellar Ortho-D ₂ H ⁺ with SOFIA	ApJ 840, 63 (2017)
L.E. Kristensen	Oxygen budget in low-mass protostars: the NGC 1333-IRAS4A shock observed in [OI] at 63 μ m	A&A 601, 4 (2017)
C.B. Glück	SOFIA/GREAT [C II] observations in nearby clouds near the lines of sight towards B0355+508 and B0212+735	A&A 600, 94 (2017)
K. Fahrion	Disentangling the ISM phases of the dwarf galaxy NGC 4212 using [C II] SOFIA/GREAT	A&A 599, 9 (2017)
J. Rho	Discovery of Broad Molecular Lines and Shocked Molecular Hydrogen from G357.7+0.3	ApJ 834, 12 (2017)
W.J.G. de Blok	Comparing [C II], HI, and CO Dynamics of Nearby Galaxies	AJ 152, 51 (2016)
P.F. Goldsmith	L1599B: loud Envelope and C ⁺ Emission in a Region of Moderately Enhanced Radiation Field	ApJ 824, 141 (2016)
M. Röllig	[C II] 158 μ m and [N II] 205 μ m emission from IC 342. Disentangling the emission from ionized	A&A 591, 33 (2016)
M. Requena	Carbon gas in SMC low-metallicity star-forming regions	A&A 589, 28 (2016)
F. Wyrowski	Infall through the evolution of high-mass star-forming clumps	A&A 585, 149 (2016)
H. Wiesemeyer	Far-infrared study of tracers of oxygen chemistry in diffuse clouds	A&A 585, 76 (2016)
A. Gusdorf	Challenging shock models with SOFIA OH observations in the high-mass star-forming region	A&A 585, 45 (2016)
S. Leurini	Spectroscopically resolved far-IF observations of the massive star-forming region G5.89-0.39	A&A 584, 70 (2015)
J.P. Pérez-Beaupuits	Disentangling the excitation conditions of the dense gas in M17 SW	A&A 583, 107 (2015)
B. Lefloch	The structure of the Cepheus E protostellar outflow: The jet, the bowshock and the cavity	A&A 581, 4 (2015)
L. Rezac	First detection of the 63 μ m atomic oxygen line in the thermosphere of Mars with GREAT/SOFIA	A&A 580, 10 (2015)
V. Ossenkopf	Fine-structure line deficit in S 140	A&A 580, 83 (2015)
Y. Okada	Velocity resolved [C II], [C I], and CO observations of the N159 star-forming region the Large Magellanic Cloud	A&A 580, 54 (2015)
G. Sandell	High spectral and spatial resolution observations of the PDR emission in the NGC 2023 reflection nebula with SOFIA and APEX	A&A 578, 41 (2015)
D.A. Neufeld	Sulphur-bearing molecules in diffuse molecular clouds: new results from SOFIA/GREAT and the IRAM 30m telescope	A&A 577, 49 (2015)
W.D. Langer	Ionized gas at the edge of the central molecular zone	A&A 576, 1 (2015)
J.P. Pérez-Beaupuits	Detection of a large fraction of atomic gas not associated with star-forming material in M17 SW*	A&A 575, 9 (2015)
A. Gusdorf	Impacts of pure shocks in the BHR71 bipolar outflow	A&A 575, 98 (2015)
H. Beuther	Carbon in different phases ([CII], [CI], and CO) in infrared dark clouds: Cloud formation signatures	A&A 571, 53 (2014)

S. Brünken	H2D ⁺ observations give an age of at least one million years for a cloud core forming Sun-like stars	Nature 516, 219 (2014)
Zinnecker, H.	SOFIA: first science highlights and future science potential	AN 334, 558 (2013)
E. O’Gorman	CARMA CO(J=2-1) Observations of the Circumstellar Envelope of Betelgeuse	AJ 144, 36 (2012)
E.T. Young	Early Science with SOFIA, the Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy	ApJ 749, 17 (2012)
T. Csengeri	SOFIA observations of far infrared hydroxyl emission toward ultra-compact HII/OH maser regions	A&A 542, L8 (2012)
J. Eislöffel	SOFIA observations of CO(12 11) emission along the L1157 bipolar outflow	A&A 542, L11 (2012)
A. Gomez	High-J CO emission in the Cepheus E protostellar outflow observed with SOFIA/GREAT	A&A 542, L9 (2012)
U. Graf	[¹² CII] and [¹³ CII] 158 m emission from NGC 2024: Large column densities of ionized carbon	A&A 542, L16 (2012)
A. Gusdorf	Probing MHD Shocks with High-J CO Observations: W28F	A&A 542, L19 (2012)
B. Mookerjea	The structure of hot gas in Cepheus B	A&A 542, L17 (2012)
D. Neufeld	Discovery of interstellar mercapto radicals (SH) with the GREAT instrument on SOFIA	A&A 542, L6 (2012)
Y. Okada	Dynamics and PDR properties in IC1396A	A&A 542, L10 (2012)
A.I. Gomez-Ruiz	High-J CO emission in the Cepheus E protostellar outflow observed with SOFIA/GREAT	A&A 542, 9 (2012)
B. Parise	Detection of OD towards the low-mass protostar IRAS 16293-2422	A&A 542, L5 (2012)
J.-P. Perez-Beaupuits	The ionized and hot gas in M17 SW: SOFIA/GREAT THz observations of [C II] and ¹² CO J=13-12	A&A 542, L13 (2012)
M. Requena	GREAT confirms transient nature of the Circumnuclear Disk	A&A 542, L21 (2012)
M. Röllig	[CII] gas in IC 342	A&A 542, L22 (2012)
R. Sahai	Probing the Mass and Structure of the Ring Nebula in Lyra with SOFIA/GREAT Observations of the [CII] 158 micron line	A&A 542, L20 (2012)
G. Sandell	GREAT [CII] and CO observations of the BD+40°4124 region	A&A 542, L14 (2012)
N. Schneider	Globules and pillars seen in the [CII] 158 m line with SOFIA	A&A 542, L18 (2012)
R. Simon	SOFIA observations of S106: dynamics of the warm gas	A&A 542, L12 (2012)
H. Wiesemeyer	High-resolution absorption spectroscopy of the OH ² Π _{3/2} ground state line	A&A 542, L7 (2012)
F. Wyrowski	Terahertz ammonia absorption as a probe of infall in high-mass star forming clumps	A&A 542, L15 (2012)

Technische Veröffentlichungen über GREAT in Fachzeitschriften

Projektleiter und Erstautor	Titel des Beitrags	Journal
C.A. Durán	4GREAT - a four-color receiver for high-resolution airborne terahertz spectroscopy	IEEE Trans. THz Sci. Tech. 11, 194-204, (2021)
H.W. Hübers	Terahertz spectroscopy using quantum-cascade lasers	Photoniques 101, 27-32 (2020)
C. Risacher	The upGREAT dual frequency heterodyne arrays for SOFIA	JAI 7 N° 4, 1840014 (2018)
C. Risacher	The upGREAT 1.9 THz multi-pixel high resolution spectrometer for the SOFIA Observatory	A&A 595, 34 (2016)
C. Risacher	First Supra-THz Heterodyne Array Receivers for Astronomy With the SOFIA Observatory	ITTST 6, 199 (2016)
H. Richter	4.7-THz Local Oscillator for the GREAT Heterodyne Spectrometer on SOFIA	ITTST 5, 539 (2015)
D. Buchel	4.7-THz Superconducting Hot Electron Bolometer Waveguide Mixer	ITTST 5, 207 (2015)
S. Heyminck	GREAT: the SOFIA high-frequency heterodyne instrument	A&A 542, L1 (2012)

P. Pütz	Terahertz hot electron bolometer waveguide mixers for GREAT	A&A 542, L2 (2012)
B. Klein	High-resolution wide-band Fast Fourier Transform Spectrometers	A&A 542, L3 (2012)
Xin Guan	GREAT/SOFIA atmospheric calibration	A&A 542, L4 (2012)
P. Pütz	NbTiN Hot Electron Bolometer Waveguide Mixers on Si ₃ N ₄ Membranes at THz Frequencies	ITAS 21, 636 (2011)
S. Heyminck	GREAT: a first light instrument for SOFIA	SPIE 7014, 10 (2008)
U. Graf	GREAT: the German first light heterodyne instrument for SOFIA	SPIE 6275, 1 (2006)
R. Güsten	GREAT: The German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies	SPIE 4857, 56 (2003)
R. Güsten	GREAT: the first-generation German heterodyne receiver for SOFIA	SPIE 4014, 23 (2000)

Öffentlichkeitsarbeit zu den Ergebnissen der GREAT Beobachtungen

Autoren	Titel des Beitrags	Journal
A. Schadwinkel	Das O der Venus – erster direkter Nachweis von Sauerstoff (Text in Deutsch)	Spiegel 46/2023
M. Rini	Tracking Isotopes in the Upper Atmosphere	Physics 16, s19 (2022)
S. Anderl U. von Rauchhaupt	Zwischen Wolken und Weltraum – Flugzeugobservatorium SOFIA (Text in Deutsch)	Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung 49/2022
N. Schneider J. Stutzki	Massereiche Sterne als Geburtshelfer (Text in Deutsch)	Physik in unserer Zeit 06/2022, 290 (2022)
T. Csengeri J. Schmelz	Science Spotlight: Deuterated Hydroxyl as a Star Formation Tracer	SOFIA Science Newsletter 08/2022
J.-B. Veyrieras	HeH ⁺ - On a trouvé la première molécule de l'Univers (Text in Französisch)	Science & Vie 08-2020, 100 (2020)
T. Csengeri H. Wiesemeyer	La stratosphérique détection de l'hydrure d'hélium (Text in Französisch)	La Recherche 555, 44 (2020)
S. Anderl	Der Anfang der Chemie – Heliumhydrid-Ion aufgespürt (Text in Deutsch)	Frankfurter Allgemeine Zeitung, 24.04.2019
J. Hattenbach	Vandalismus im Nebel – Sternentstehung (Text in Deutsch)	Frankfurter Allgemeine Zeitung, 18.01.2019
H. Wiesemeyer	SOFIA und der kosmische Materiekreislauf (Text in Deutsch)	Nat.wiss. Rundschau 65, 511 (2012)