



FOTO: MPI FÜR METEOROLOGIE / NASA WORLDVIEW

Vielgestaltig: In den Tropen und Subtropen bilden sich in einem Gürtel, in dem der Passatwind vorherrscht, zahllose Wolken. Diese Passatwolken kühlen das Klima, da sie Sonnenlicht reflektieren. Sie können verschiedene Formen annehmen – die hier abgebildete wird als Blume bezeichnet.

# EIN SCHIRM AUS BLUMENWOLKEN

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Tropische Passatwolken wirken wie ein Kühlelement im Klimasystem: In der Äquatorzone dienen sie als Schutzschirm gegen die wärmende Sonnenstrahlung. Doch reduziert der menschengemachte Klimawandel möglicherweise ihre Dichte, sodass sich die Erderwärmung verstärkt? Die Eurec<sup>4</sup>a-Feldstudie, die Bjorn Stevens, Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, mitinitiiert hat, ist dieser und anderen Fragen zum tropischen Wolken-geschehen nachgegangen – mit überraschenden Ergebnissen.

Anfang 2020 versammelte die Klimaforschung vor Barbados eine See- und Luftflotte, wie sie vorher nur selten an den Start gegangen war: Vier Forschungsschiffe, darunter die beiden deutschen Schiffe Meteor und Maria S. Merian, und fünf Forschungsflugzeuge, darunter der Jet Halo des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), eine französische ATR-42 und eine US-amerikanische Lockheed WP-3D Orion Hurricane Hunter, gingen in den Tropen auf Wolkenjagd. Auf Barbados nahm das große Wolkenradar Poldirad des DLR seinen Betrieb auf. Mehr als 300 Forschende aus 20 Nationen beteilig-

ten sich an dieser Großoperation. Das Untersuchungsobjekt: die kleinen, niedrigen Passatwolken.

Eurec<sup>4</sup>a hieß die vierwöchige Kampagne, das steht für „Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate“, also „Klärung der Rolle der Wolken-Zirkulations-Kopplung für das Klima“. Natürlich spielt der Name auch auf Archimedes an; der soll beim Baden das Gesetz des Auftriebs entdeckt und gerufen haben: „Heureka!“ – „Ich hab's gefunden!“ Darauf weist Bjorn Stevens hin, denn: „Bei Wolken geht es wirklich um Auftrieb!“ Der Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg hat die Eurec<sup>4</sup>a-Kampagne gemeinsam mit seiner französischen Kollegin Sandrine Bony, Direktorin am Centre National de la Recherche Scientifique in Paris, konzipiert und geleitet. Unterstützt wurden sie vor Ort durch David Farrell, Leiter des Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology. Stevens hat auch gemeinsam mit Farrell das Barbados Cloud Observatory am östlichsten Punkt der Insel aufgebaut, das 2010 in Betrieb ging. Aber warum treibt die Klimaforschung einen sol-

chen Aufwand um kleine Wölkchen in den Tropen? Passatwolken sind niedrige Wolken, sie bilden sich schon in etwa 700 Metern Höhe und dehnen sich – meist – nur bis in zwei Kilometer Höhe aus. Dennoch stellen sie ein Schwergewicht im Klimasystem dar, weil sie so viele sind. Sie sind gesellig wie eine Schafherde und bedecken mehr als 30 Prozent der Gesamtfläche der Passatwindzone, die wie ein Gürtel ein Fünftel der Erde in den Tropen und Subtropen umspannt. Damit bilden die Wolken zusammen einen großen Spiegel, der einen beträchtlichen Teil der Sonnenstrahlung ins All reflektiert und somit die Erde kühlt. Da die Passatwolken eine viel größere Fläche bedecken als das Polareis und zudem fast senkrechter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist ihre Spiegelwirkung für die Wärmestrahlung viel gewichtiger als die der großen Eisflächen in der Arktis und der Antarktis.

Würde nun die Dichte der Passatwolken mit dem Klimawandel abnehmen, dann hätte das erhebliche Auswirkungen auf das Erdklima. Diese Besorgnis lösten die Ergebnisse einiger Kli-

53





Alle anpacken! Mitglieder des Eurec<sup>4</sup>-Teams helfen beim Aufbau des Regenradars Poldirad. Damit untersuchen die Forschenden die Niederschlagsbildung in den Passatwolken.



FOTO: MPL-A, F. BÄTTER

54

mastudien aus, insbesondere eine wissenschaftliche Arbeit, die 2014 in der britischen Fachzeitschrift *Nature* erschien. Zugespielt gesagt, war das Ergebnis dieser Klimasimulationen, dass die Erderwärmung die Passatwolken teilweise wegtrocknen könnte. Die Folge wäre also eine Verstärkung der Erwärmung, was wiederum die Passatwolken-Bedeckung reduzieren würde. „Positive Rückkopplung“ ist der Fachbegriff für einen solchen Teufelskreis.

Nun ist es so, dass die großen, erdumspannenden Klimamodelle zwar sehr zuverlässig geworden sind, wenn es um die Simulation globaler Trends geht: Dass die Menschheit durch ihre Emissionen von Treibhausgasen die Erde erwärmt, steht wissenschaftlich außer Zweifel. Aber mit der Simulation der Wolkenbildung und folglich mit der Frage, wie Wolken auf die Erderwärmung antworten werden, tun sich heutige Klimamodelle recht schwer. Sie konnten die kleinteiligeren Prozesse, die dabei eine Rolle spielen, nicht erfassen. Und es gibt immer noch Wissenslücken, wenn es um ein genaueres Verständnis geht, wie Wolken entstehen und wie sie sich verhalten. Deshalb sollte Eurec<sup>4</sup> die Passatwolken vor Ort durchleuchten. Die vierwöchige Kampagne sollte Daten über ihr Entstehen und Ver-

gehen sammeln, über ihre Reaktion auf wärmere, kältere, trockenere und feuchtere Wetteränderungen. Dazu liefen diverse Forschungsaktivitäten parallel, eng aufeinander abgestimmt. Den Kern dieser Wolkenforschung bildete ein zylinderförmiges Volumen von rund 10 Kilometern Höhe und circa 220 Kilometern Durchmesser.

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Eurec<sup>4</sup>-Kampagne hat mit vier Forschungsschiffen, fünf Flugzeugen und weiteren Instrumenten die tropischen Passatwolken untersucht.

Die Dichte der Passatwolken wird durch den Klimawandel absehbar nicht abnehmen, da die flache mesoskalige Umwälzzirkulation Feuchtigkeitsverluste ausgleicht, die die Erderwärmung verursacht: Die kühlende Wirkung der Passatwolken bleibt vorerst erhalten.

Ein besseres Verständnis davon, wie sich in Passatwolken Niederschlag bildet und warum die Passatwolken verschiedene Formen annehmen, hilft Klimamodelle und ihre Prognosen zu präzisieren.

---

In diesem Volumen versuchte das Team vor allem die Luftbewegungen möglichst lückenlos zu erfassen, zusammen mit der transportierten Feuchtigkeit. Grundsätzlich entstehen Kumuluswolken, umgangssprachlich: Quellwolken, aus Luft, die wärmer ist als ihre Umgebung und mehr verdunstendes Wasser aufnehmen kann. Da Wassermoleküle leichter als Sauerstoffmoleküle sind, sorgt ein höherer Feuchtegehalt sogar für mehr Auftrieb als eine höhere Temperatur. Die Luft steigt auf, Konvektion entsteht.

In etwa 700 Metern Höhe kondensiert dann der mittransportierte Wasserdampf zu Wolkenröpfchen, erklärt Raphaela Vogel. Sie hat an Eurec<sup>4</sup> teilgenommen und ist heute wissenschaftliche Mitarbeiterin der Universität Hamburg. „Deshalb haben diese Kumuluswolken unten an der Basis so eine messerscharfe Kante“, erklärt sie. Das kann man auch in Europa bei schönem Sommerwetter gut beobachten. Vogel hat am Max-Planck-Institut für Meteorologie promoviert und war als Postdoktorandin in Bonys Gruppe auf Barbados dabei. Ihre Aufgabe war es damals, das Flugprogramm als leitende Wissenschaftlerin zu koordinieren. Dazu flog sie meist auf der französischen ATR-42 mit, gelegentlich auch auf der deutschen

Halo. Es sei eine sehr aufregende Zeit gewesen, erzählt sie begeistert, die Kampagne habe das internationale Team zusammengeschweißt.

## Flugzeuge für jedes Wolkenstockwerk

Der deutsche Jet Halo war zuständig für das höchste Stockwerk. Er flog den oberen Kreisabschnitt des Zylinders im Lauf der vier Wochen 72-mal ab, hinzu kamen 13 solcher Rundflüge mit der amerikanischen WP-3D. Und jedes Mal saß Geet George im Heck, damals Doktorand in Stevens' Gruppe und heute Assistenzprofessor an der Technischen Universität Delft. Er kümmerte sich um eine zentrale Messung: Auf exakt zwölf Positionen des 360-Grad-Rundkurses, wie die Fünfminutenstriche auf einem Uhrenziffernblatt, schoss er Wurfsonden aus dem Flugzeug. Diese schwebten dann an Fallschirmen die zehn Kilometer hinunter zur Meeresoberfläche. Ihre Papprohren enthielten einen Sender, drei Sensoren für Druck, Temperatur

und den relativen Feuchtegehalt der Umgebungsluft sowie einen GPS-Empfänger. Auf ihrem etwa zwölfminütigen Weg nach unten sendeten zwei- bis viermal pro Sekunde ihre Messwerte und Positionen an Halo. Besonders wichtig waren die GPS-Daten, denn sie lieferten die Information, wie weit der auf der jeweiligen Höhe herrschende Wind die Sonden zur Seite blies. Aus diesen Daten errechnete George, welche Luftmassen durch die gedachte Wand in das umzirkelte Messvolumen hereinfließen – oder hinaus. Da die Erhaltungssätze der Physik verbieten, dass Luft einfach verschwindet oder hinzukommt, lässt sich daraus errechnen, wie sich die Konvektion innerhalb des Zylinders verhält.

Die französische ATR-42 hatte die Aufgabe, innerhalb des gedachten Messzylinders viel tiefer, auf Höhe der Wolkenbasis, zu fliegen. Besonders wichtig waren dabei Instrumente, die die Wolken seitlich mit Radar und Lidar, eine Art Laserscanner, abtasteten. Sie lieferten vor allem Informationen über die Wolkentröpfchen und deren

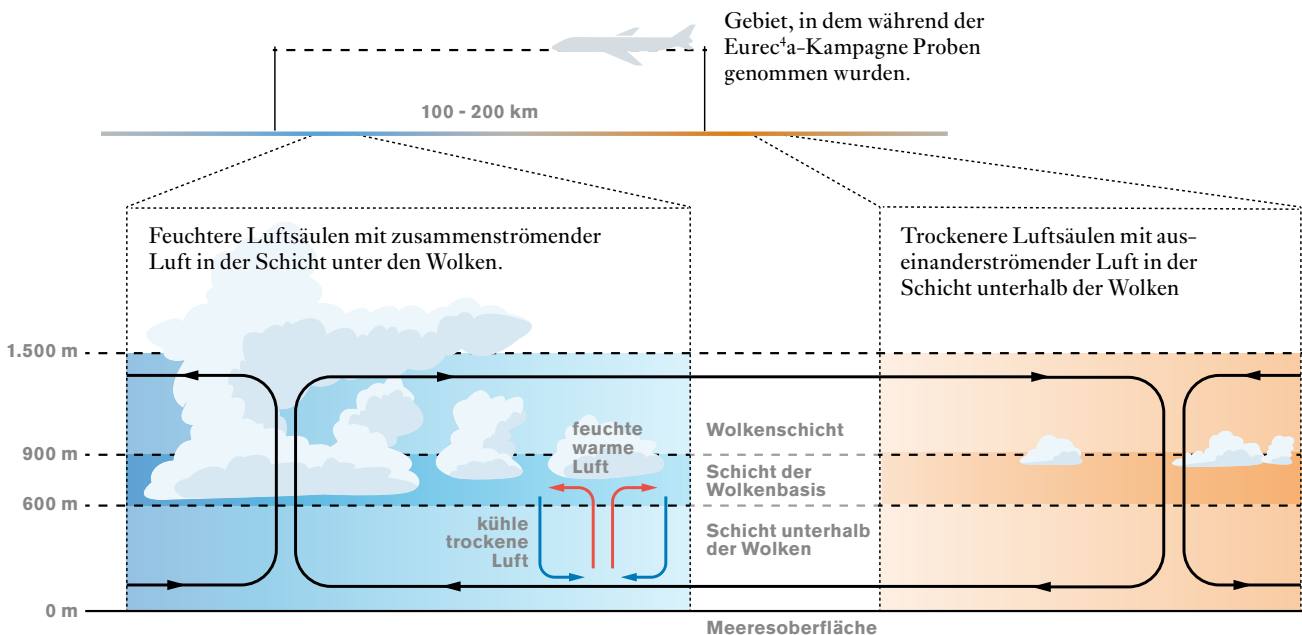
Bewegungen. Damit diese Instrumente möglichst horizontal blickten, musste das Flugzeug waagrecht im Geradeausflug ausgerichtet sein. Daher flog die ATR-42 immer wieder einen Kurs ab, der wie bei einem römischen Wagenrennen aus zwei engen Kurven und langen geraden Streckenabschnitten bestand. Auch hier war Disziplin gefordert, selbst wenn es kaum Wolken gab, um in den vier Wochen ein Gesamtbild bei allen Wetterlagen zu erhalten. „Das war nicht immer leicht durchzusetzen“, erzählt Raphaela Vogel lachend, „wenn etwas weiter weg ein schönes Gewitter lockte.“ Im Nachhinein ist sie vor allem beeindruckt davon, wie zuverlässig die Eurec<sup>4</sup>a-Daten sind. Aber was kam nun dabei heraus?

Dazu erklärt die Forscherin zunächst, was bei der Wolkenbildung grundsätzlich geschieht: Feuchte, von der Sonne erwärmte Luft steigt über dem Wasser auf, zum Ausgleich muss kühlere, trockene Luft aus größerer Höhe absinken. Wenn die feuchte Luft in diesem Konvektionsaufzug in die Höhe fährt, sinkt ihre Temperatur,

55



Eine bislang unbekanntere Feuchtigkeitskreislauf in der Atmosphäre: Quellwolken bilden sich dort, wo warme, feuchte Luft aufsteigt; zwischen den Wolken sinkt kühlere, trockene Luft hinab. Diese konvektive Strömung ist seit Langem bekannt. Im Eurec<sup>4</sup>a-Projekt haben Forschende nun eine mesoskalige Luftzirkulation über 100 bis 200 Kilometer entdeckt, die Feuchtigkeit dorthin bringt, wo die Wolken entstehen. Es ist daher nicht zu befürchten, dass die Passatwolken infolge der Erderwärmung wegtrocknen.



GRAFIK: GCO NACH GEORGE, G., STEVENS, B., BONY, S. ET AL. WIDESPREAD SHALLOW MESOSCALE CIRCULATIONS OBSERVED IN THE TRADES. NAT. GEOSCI. 16, 584–589 (2023).

und so kondensiert ein Teil des Dampfes zu Wolkentröpfchen. Diese feuchten, tröpfchenhaltigen Luftmassen vermischen sich mit den von oben kommenden trockeneren Luftmassen. Das lässt wieder einen Teil der Tropfen verdunsten. Dabei verschwindet das Wasser nicht, es wird nur wieder gasförmig und trägt so nicht zur Wolke bei. Ein wärmeres Klima allerdings könnte nun bewirken, dass sich weniger Wolkentröpfchen bilden, weil die von oben kommende Luft durch die Erderwärmung mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Die Folge wäre, dass immer weniger Passatwolken entstehen, was wiederum – wegen der abnehmenden Spiegelwirkung – die Erderwärmung beschleunigen würde. Das wäre die bereits erwähnte positive Rückkopplung.

Den Ergebnissen der Eurec<sup>4</sup>a-Kampagne zufolge ist diese Rückkopplung bei Weitem nicht so stark, wie einige Klimamodelle befürchten ließen. Das zeigte ein Team um Raphaela Vogel, zu dem auch Bjorn Stevens und San-

drine Bony gehörten, in einer Publikation über die wichtigsten Resultate der Feldstudie im Fachblatt *Nature* im Dezember 2022. „Das sind doch mal gute Neuigkeiten für uns Menschen“, sagt Raphaela Vogel. Warum das so ist, erklärt Geet George. Er war maßgeblich an einer zweiten wichtigen Veröffentlichung zu den Ergebnissen beteiligt, die im Juli 2023 in *Nature Geoscience* erschien. Entscheidend seien atmosphärische Zirkulationen, erklärt der Wissenschaftler, die so klein sind, dass sie durch das Raster bisheriger globaler Klimamodelle fallen.

## Genug Nachschub an Feuchtigkeit

Diese „flachen mesoskaligen Umwälz-zirkulationen“, englisch *shallow meso-scale overturning circulations*, erstrecken sich über Flächen in der Größenordnung des von Halo umflogenen Gebiets und reichen bis in etwa 1,5 Kilometer Höhe. „Mesoskalig“ bedeutet, dass es um Prozesse in mittelgroßen Räumen des Klimasystems von grob 100 bis 200 Kilometer Ausdehnung geht. Und diese Zirkulation durchmischt feuchte und trockene Luftmassen kräftiger, als einige glo-

bale Klimamodelle dies erwarten ließen. Grundsätzlich funktioniert sie wie die Konvektion, die Wolken entstehen lässt, nur dass sie sich genau in diesen mittelgroßen Räumen abspielt, die bei Barbados umflogen wurden. Sie liefert genügend Nachschub an Feuchtigkeit, um das Wegtrocknen der Wolkentröpfchen in einer wärmeren Umgebung weitgehend auszugleichen. Die aufsteigende, feuchte Luft und die fallende, trockene Luft bilden zusammen die aufsteigenden und absteigenden Teile der flachen, mesoskaligen Zirkulation – wie bei einem altmodischen Paternosteraufzug, der mit unterschiedlich besetzten Kabinen auf einer Seite hinauf- und daneben hinunterfährt.

„Wir haben ein neues Zirkulationssystem identifiziert, das die Variabilität in der Wolkenbedeckung beeinflusst“, bilanziert Bjorn Stevens. „Und dieser Mechanismus existiert in unseren bisherigen Klimamodellen nicht!“ Die Entdeckung, wie bedeutend diese flache Zirkulation in Räumen von etwa 100 bis 200 Kilometern für die heutige und zukünftige Existenz der Passatwolken ist, war die wichtigste Erkenntnis von Eurec<sup>4</sup>a. Darüber hinaus gab es noch andere neue Einsichten ins Wolkengeschehen, zum Beispiel wie Bewegung und Organisation

56

Scharfer Blick: Mit einem Laser messen Forschende Eigenschaften der Wolken, aus denen sie Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile ableiten.



FOTO: MPI-M, F. BÄTTER



der Passatwindwolken den Niederschlag aus ihnen beeinflussen. Unter welchen Bedingungen aus Wolkentröpfchen Regen, Schnee oder Hagel wird, kann die Klimaforschung noch nicht genau erklären, dies ist aber für Wettervorhersagen und Simulationen regionaler Klimaveränderungen relevant. Um die Niederschlagsbildung in Passatwolken besser zu verstehen, hat Jule Radtke als Doktorandin am Max-Planck-Institut für Meteorologie die Messungen von Poldirad auf Barbados ausgewertet. „Poldirad“ steht für Polarisations-Doppler-Radar. Dieser technische Terminus besagt im Kern, dass das Großgerät über das Radarecho sehr genau die Bewegungen der Tröpfchen in einer Wolke verfolgen kann. Normalerweise steht Poldirad am DLR-Standort in Oberpfaffenhofen. Mit finanzieller Unterstützung der Max-Planck-Förderstiftung wurde die Anlage für Eurec<sup>4</sup>a demontiert und auf einem Schiff über den Atlantik geschickt. Nach mehreren Monaten kam sie in Barbados an und blieb erst einmal in den Zollformalitäten stecken. Doch trotz aller Hindernisse gelang es dem Team, das Radargerät rechtzeitig in der Nähe des Barbados Cloud Observatory in Betrieb zu nehmen.

Radtke untersuchte mit Daten von Poldirad, welchen Einfluss das Herdenverhalten der Passatwolken auf ihren Niederschlag hat. „Früher hieß es immer, dass diese kleinen Passatwindwolken Schönwetterwolken sind, die nicht hoch wachsen und daher auch nicht regnen“, sagt die Klimaforscherin, „und dass sie sich eher zufällig verteilen.“ Schon vor Eurec<sup>4</sup>a war aber klar, dass dieses Bild nicht stimmt. Radtke kam zu dem Ergebnis, dass der Herdentrieb einen deutlichen Einfluss auf das Regenverhalten der Wolken hat. Drängen sich die Wolken stärker zusammen, regnet es aus ihnen öfter. Denn offenbar schützen sie sich gegenseitig vor der Sonne. Das bewirkt eine feuchtere Atmosphäre und verhindert, dass Regentropfen wieder verdunsten, bevor sie den Boden erreichen. Dafür regnet es aus den Wolken in der Herde schwächer, weil in ihnen weniger Regen gebildet wird. „Das könnte daran liegen, dass da auch jüngere oder ältere Wolken

Wolkenjäger: Geet George war maßgeblich an den Messungen mit Halo beteiligt. Mithilfe von Wurfsonden bestimmte er die Konvektion in dem Gebiet, in dem das Forschungsflugzeug unterwegs war.



FOTO: DANIEL BECKMANN / DLR

mit herumhängen“, sagt Radtke lachend, „die noch nicht oder nicht mehr zum Niederschlag beitragen.“

## Blumen und Fische am Himmel

Dass die Selbstorganisation der Wolken sehr komplex ist, hatte Bjorn Stevens' Team schon in der Vorbereitungsphase zu Eurec<sup>4</sup>a entdeckt. Mithilfe von Maschinenlernen und Mustererkennung hatten die Hamburger in Satellitenbildern vier verschiedene Herdenmuster identifiziert, die sie „Zucker (Sugar)“, „Kies (Gravel)“, „Blumen (Flowers)“ und „Fisch (Fish)“ taufte. Letztere Struktur erinnert tatsächlich an ein Fiskskelett. Gemeinsam mit Hauke Schulz, der heute an der University of Washington in Seattle forscht, untersuchte Stevens unter anderem, ob ein hochauflösendes Klimamodell, das auf ein kleineres Gebiet beschränkt ist, um Rechenleistung zu sparen, mit den Eurec<sup>4</sup>a-Daten diese Muster simulieren kann. Für „Fisch“ und „Kies“ gelang die Simulation schon recht gut, für „Blumen“ nicht. Wie wichtig es ist, dass zukünftige Klimamodelle diese Strukturen ganz genau simulieren können, das sei noch offen, betont Stevens. Zumindest die durchschnittliche Wolkenbedeckung müssen die Modelle jedenfalls möglichst genau berechnen, die Wolkenform könnte dabei ein relevanter Faktor sein. Die Lehre aus Eurec<sup>4</sup>a sei, dass Klima-

modelle grundsätzlich viel feiner gestrickt sein müssen, um solche mesoskaligen Vorgänge auch in einem künftigen, wärmeren Klima simulieren zu können.

Bjorn Stevens ist optimistisch, dass die hochauflösenden Klimamodelle der Zukunft wesentlich genauere Vorhersagen für kleinräumige Vorgänge ermöglichen werden. Erst wenn Klimamodelle die Prozesse in der Atmosphäre noch besser erfassen, können sie etwa regionale Klimaveränderungen genauer prognostizieren. Dabei hilft sicher auch, dass der Klimaforschung immer leistungsfähigere Supercomputer zur Verfügung stehen. Die Feldforschung in der Natur werden aber auch diese Computer nicht ersetzen können. Im August und September 2024 läuft die Nachfolgefeldstudie Orcestra, und wieder wird Barbados die Basis sein.

57



## GLOSSAR

### FLACHE MESOSKALIGE UMWÄLZZIRKULATION

heißt eine im Rahmen der Eurec<sup>4</sup>a-Kampagne entdeckte Luftbewegung, bei der in Räumen von 100 bis 200 Kilometern warme, feuchte Luft aufsteigt und kalte, trockene Luft absinkt. Die Zirkulation gleicht die durch die Erderwärmung verursachten Feuchtigkeitsverluste der Passatwolken aus.