

Die Berechnung des Internationalen Terrestrischen Referenzrahmens ITRF2008 am DGFI

Manuela Seitz, Detlef Angermann, Mathis Bloßfeld, Michael Gerstl, Robert Heinkelmann, Rainer Kelm und Horst Müller

Zusammenfassung

Der internationale terrestrische Referenzrahmen ITRF2008 wird von zwei Kombinationszentren des IERS, dem DGFI und dem IGN, berechnet. Das am DGFI verwendete Verfahren basiert auf der Kombination von Normalgleichungen, die aus den Beobachtungen der geodätischen Raumverfahren GPS, VLBI, SLR und DORIS abgeleitet werden und frei von Bedingungen bezüglich des geodätischen Datums sind. Wichtige Schritte bei der Kombination sind die Analyse der Parameterzeitreihen sowie die sorgfältige Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren, die zur lokalen Verknüpfung der verschiedenen Raumbeobachtungsverfahren benötigt werden. Der berechnete Referenzrahmen zeichnet sich durch eine hohe Konsistenz und Genauigkeit im Bereich von wenigen Millimetern aus und zeigt eine gute Übereinstimmung mit anderen globalen Referenzrahmen.

Summary

The International Terrestrial Reference Frame ITRF2008 has been computed by two IERS Combination Centres, DGFI and IGN. The strategy implemented at DGFI is based on combining normal equations free of constraints w. r. t. the geodetic datum which are derived from the observations of the space geodetic techniques GPS, VLBI, SLR and DORIS. Important steps of the combination are the analysis of the parameter time series and the careful selection of terrestrial difference vectors (local ties) which are essential for the combination of the station coordinates. The computed reference frame is characterized by a high consistency and accuracy and agrees well with other global reference frames.

1 Einführung

Das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS) ist ein globales, geozentrisches, kartesisches Koordinatensystem, das den Bewegungen der Erde im Weltraum unterliegt, also erdfest genannt werden darf. Das Referenzsystem wird durch die Koordinaten konkreter Punkte zugänglich gemacht. Ein solches Netz global verteilter Stationen ist der Internationale Terrestrische Referenzrahmen (engl.: International Terrestrial Reference Frame, ITRF). Er wird als eine Realisierung des ITRS bezeichnet. Um den Zusammenhang zwischen den Koordinaten der Stationen und dem System eindeutig beschreiben zu können, ist es notwendig, physikalische Modelle (z. B. Modell

der Gezeiten der festen Erde, Auflastmodelle, ...) explizit festzulegen. Es wird daher auch von einem konventionellen Referenzsystem gesprochen. Die entsprechenden Konventionen sind in den IERS-Standards (IERS 2004) veröffentlicht.

Ein erdfestes Koordinatensystem ist die Grundlage für die Beschreibung der Gestalt der Erde sowie von Vorgängen auf der Erdoberfläche, im erdnahen Raum und im Erdinneren. Es ist damit wesentliche Voraussetzung für die Realisierung nationaler und regionaler Referenzsysteme, für präzise Navigation, für die Referenzierung von Geoinformationsdaten und für wissenschaftliche Untersuchungen im System Erde. Dazu gehören unter anderem die Bestimmung tektonischer Bewegungen, der Variationen des Meeresspiegels, periodischer, episodischer und säkularer Bewegungen der Erdoberfläche, des Erdschwerefeldes und seiner zeitlichen Variation und nicht zuletzt der Orientierung der Erde im Weltraum. Die Realisierung des ITRS erfolgt mithilfe der Messdaten der Radiointerferometrie auf sehr langen Basislinien (engl.: Very Long Baseline Interferometry, VLBI), der Laserentfernungsmessung zu Satelliten (engl.: Satellite Laser Ranging, SLR), den Satellitenpositionierungssystemen GPS (engl.: Global Positioning System) und GLONASS sowie dem Dopplermesssystem DORIS (engl.: Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite). Diese Beobachtungsverfahren sind neben anderen Bestandteil des globalen geodätischen Beobachtungssystems GGOS (engl.: Global Geodetic Observing System) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG), das der Überwachung des Erdsystems mit seinen Komponenten feste Erde, Hydrosphäre, Atmosphäre und anderen Subsystemen dient (Rummel et al. 2005 und GGOS 2009). Ziel von GGOS ist es, konsistente, zuverlässige geodätische Parameter auf Basis eines einheitlichen ITRF bereitzustellen, um Vorgänge im Erdsystem zu beschreiben und damit einen Beitrag zur Bestimmung des globalen Wandels zu liefern.

Der Internationale Erdrotations- und Referenzsystemdienst (engl.: International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) ist seit seiner Entstehung im Jahr 1987 (siehe auch www.iers.org) u. a. für die Veröffentlichung des ITRF verantwortlich. Seit der Einführung der neuen Struktur im Jahr 2001 betreibt der IERS drei ITRS-Kombinationszentren, die mit der Berechnung des ITRF betraut sind: das *Institut Géographique National* (IGN) in Paris, das *Deutsche Geodätische Forschungsinstitut* (DGFI) in München und das *Institut Natural Resources Canada* in Ottawa. Die Institute berechnen aus identischen Ein-

gangsdaten je eine ITRF-Lösung, wobei unterschiedliche Strategien angewendet werden. Durch einen Vergleich der Lösungen können eventuelle Probleme aufgedeckt und die Genauigkeit des ITRF abgeschätzt werden.

2 Der ITRF2008

Zeitgleich mit diesem Artikel wird der neueste terrestrische Referenzrahmen des IERS, der ITRF2008, veröffentlicht. ITRF-Lösungen werden im Abstand von zwei bis fünf Jahren neu berechnet, um die Aktualität und bestmögliche Genauigkeit des Referenzrahmens sicherzustellen. Anlass für die Neuberechnung sind neue Beobachtungsdaten, die Verdichtung des Netzes, neue physikalische Modelle zur Reduktion der Beobachtungen sowie die Weiterentwicklung der Kombinationsstrategie. Beginnend mit dem ITRF88 wurden bislang zwölf ITRF-Lösungen veröffentlicht. Ein erster wichtiger Schritt zur Verbesserung der ITRF-Lösungen erfolgte bei der Berechnung des ITRF94, für den erstmals die vollständigen Varianz-Kovarianzmatrizen, die aus der Auswertung der einzelnen Beobachtungstypen resultieren, verwendet wurden (Boucher et al. 1996).

Eine weitere Optimierung der Berechnungsstrategie wurde mit dem ITRF2005 eingeführt: Als Eingangsdaten werden nicht mehr die Mehrjahreslösungen der einzelnen Beobachtungsverfahren, sondern tägliche oder wöchentliche Lösungen (bzw. Normalgleichungssysteme) verwendet. Dadurch können – für alle Verfahren einheitlich – durch Analyse der Zeitreihen Diskontinuitäten (z. B. verursacht durch Erdbeben oder Instrumentenwechsel) identifiziert und die Ergebnisse als Bestandteil des ITRF-Produktes veröffentlicht werden. Als weitere Neuerung werden seitdem neben den Stationskoordinaten auch die Erdorientierungsparameter (EOP) kombiniert und beide Parametertypen in einer gemeinsamen Ausgleichung konsistent bestimmt.

Der ITRF2008 wurde nach derselben Strategie wie der ITRF2005 (Altamimi et al. 2007 und Angermann et al. 2007) berechnet. Die Genauigkeitssteigerung geht hier auf die erheblich verbesserte Modellierung der Beobachtungen zurück. Die Verbesserungen, die sich besonders stark auswirken, sind in Tab. 1 zusammengefasst. Wie später in Abschnitt 3.2 noch gezeigt wird, kann damit die Konsistenz und Genauigkeit des ITRF2008 im Vergleich zum ITRF2005 global im Bereich von wenigen Millimetern, für einzelne Stationen bis zu 1 cm, verbessert werden.

Die Eingangsdaten für den ITRF2008 wurden von den internationalen Diensten der Beobachtungsverfahren zur Verfügung gestellt: dem *International GNSS Service* (IGS), dem *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS), dem *International Laser Ranging Service* (ILRS) und dem *International DORIS Service* (IDS). Einen Überblick über die Eingangsdaten gibt Tab. 2.

Die Daten der einzelnen Verfahren liegen für unterschiedliche Zeitspannen von 12 bis 29 Jahren vor. Ursachen dafür sind die unterschiedlichen Zeitpunkte, seit denen globale Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen, und die sehr aufwendige Reprozessierung der GPS-Daten mit neuen Modellen, die bisher nicht abgeschlossen ist, sodass die GPS-Daten von 1994 bis Ende 1996 noch nicht einbezogen werden konnten.

Die Berechnung des ITRF2008 erfolgt an den zwei Kombinationszentren DGFI und IGN weitgehend unabhängig, um durch einen Vergleich der Lösungen die Genauigkeit des Referenzrahmens abschätzen zu können. Diese Veröffentlichung beschreibt die Berechnung der ITRF2008-Lösung am DGFI (nachfolgend ITRF2008D genannt).

Tab. 1: ITRF2008: Verbesserungen gegenüber dem ITRF2005 in den Reduktionsmodellen der Raumbeobachtungsverfahren

Verfahren	Verbesserung der Reduktionsmodelle
GPS	■ Wechsel von relativen zu absoluten Phasenzentrumskorrekturen (PCV) ■ Verbesserte Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung
VLBI	■ Vereinheitlichung des Polgezeitenmodells ■ Modellierung der thermalen Deformation der Antennen ■ Verbesserte Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung
SLR	■ Neue Streckenkorrekturen für einige Stationen (engl.: range bias)
DORIS	■ Verbesserte Modelle zur Beschreibung der Wirkung des Strahlungsdrucks der Sonne und des Luftwiderstandes auf die Satelliten ■ Verbesserte Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung

Tab. 2: Eingangsdaten des ITRF2008

Verfahren	Dienst	Datenformat	Zeitspanne
GPS	IGS	wöchentl. Lösungen	1997.0 – 2009.0
VLBI	IVS	sessionweise datumsfreie Normalgleichungen	1980.0 – 2009.0
SLR	ILRS	wöchentl. Lösungen	1983.0 – 2009.0
DORIS	IDS	wöchentl. Lösungen	1993.0 – 2009.0

3 Berechnung des ITRF2008D am DGFI

Die Berechnung des ITRF am DGFI basiert auf der Kombination von Normalgleichungen (NGL) der verschiedenen Verfahren, die frei von Bedingungen zur Festlegung des geodätischen Datums (bedingungslos) sind. Im Gegensatz dazu basiert die Berechnungsstrategie des IGN auf der Kombination von Lösungen. Damit ergeben sich ei-

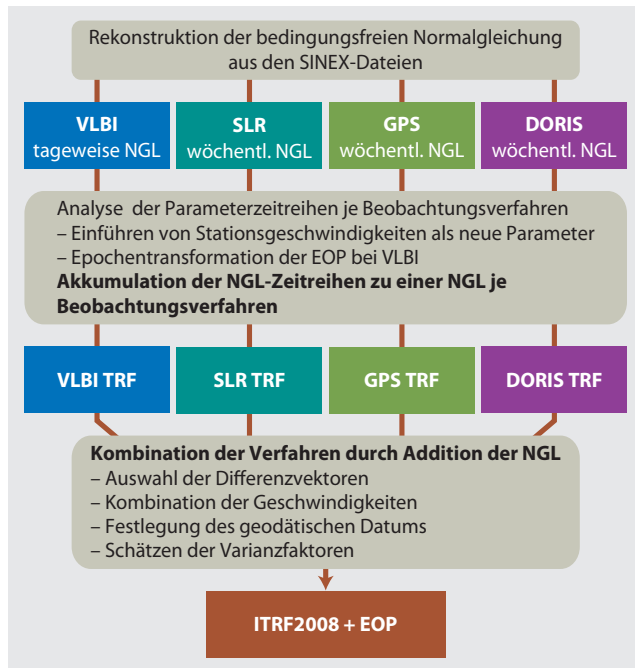


Abb. 1: Schematische Darstellung der Berechnung des ITRF2008 am DGFI

nige wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Strategien:

- Bei der Kombination von Normalgleichungen werden Verbesserungen zu den ursprünglichen Beobachtungen, bei der Kombination von Lösungen hingegen Zuschläge zu den Parametern (Stationskoordinaten, EOP) geschätzt.
- Für die Akkumulation bedingungsfreier Normalgleichungen sind keine zusätzlichen Bedingungen nötig, wohingegen für die Akkumulation von Lösungen mittels Bedingungen über das Datum der Eingangsdaten verfügt werden muss. Um eine Verzerrung der Netze zu vermeiden, dürfen nur sogenannte Minimalbedingungen (nicht-deformierende Bedingungen) verwendet werden.
- Um über das geodätische Datum des ITRF frei verfügen und es den IERS-Standards entsprechend festlegen zu können, werden bei der Kombination von Lösungen Parameter einer Ähnlichkeitstransformation zwischen den eingehenden Lösungen und der ITRF-Lösung geschätzt. Diese Transformationsparameter, die den Unterschied im geodätischen Datum repräsentieren, können zudem nicht modellierte Stationsbewegungen, wie beispielsweise post-glaziale Landhebung, aufnehmen.

Dadurch werden jedoch die geschätzten Stationskoordinaten verfälscht, der Koordinatenursprung befindet sich nicht mehr im Massenzentrum der Erde und der Maßstab der Lösung ist nicht mehr streng metrisch (Drewes 2009a). Zusätzlich kann es durch unerwünschte Korrelationen zwischen den Transformationsparametern zu einer systematischen Rotation der Netze kommen. Diese Korrelationen treten insbesondere in den frühen Jahren auf, da die Stationen zu dieser Zeit eine inhomogenere globale Verteilung aufwiesen.

Die Berechnung des ITRF am DGFI ist in Abb. 1 vereinfacht dargestellt. Sie besteht aus zwei Schritten:

1. Die Lösung der einzelnen Wochen- bzw. Session-NGL je Verfahren sowie die Analyse der daraus resultierenden Parameterzeitreihen und die Akkumulation der NGL zu einer NGL je Beobachtungsverfahren,
2. die Kombination der NGL der vier Beobachtungsverfahren. Die mathematischen Grundlagen der einzelnen Schritte sind ausführlich in Angermann et al. (2004) und Seitz (2009) beschrieben.

3.1 Berechnung einer akkumulierten NGL je Beobachtungsverfahren

Eine lineare Modellierung der Stationsbewegung durch eine Position und eine Geschwindigkeit erfordert die Berücksichtigung von Sprüngen, die durch Bewegungen des geologischen Untergrundes, z.B. Erdbeben, aber auch durch Instrumentenwechsel hervorgerufen werden. Um solche Diskontinuitäten zu identifizieren, muss eine Analyse aller Stationspositionszeitreihen durchgeführt werden. Tab. 3 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Stationen, auf denen Diskontinuitäten erkannt und berücksichtigt wurden.

Tab. 3: Zahl der Stationen im ITRF2008D und (prozentualer) Anteil mit Diskontinuitäten

Verfahren	Zahl der Stationen	davon mit Diskontinuitäten (prozentual)
GPS	560	440 (79%)
VLBI	104	22 (21%)
SLR	122	30 (25%)
DORIS	132	48 (36%)

Die Werte in Tab. 3 zeigen, dass die GPS-Stationen im ITRF deutlich überwiegen. Die GPS-Stationen sind jedoch auch am häufigsten von Diskontinuitäten betroffen. Ursache ist meist ein Instrumentenwechsel, der für GPS einfacher und vor allem kostengünstiger ist als für VLBI und SLR.

Der Koordinatenursprung des ITRF2008D wird entsprechend den IERS-Standards (IERS 2004) mittels der

SLR-Beobachtungen realisiert. Um Systematiken in den Beobachtungen zu erkennen, die zu einer Verfälschung des realisierten Ursprungs führen, werden Translationszeitreihen berechnet und analysiert. Man erhält sie, indem zunächst eine erste SLR-Mehrjahreslösung (SLR-TRF) aus allen SLR-Eingangsdaten berechnet wird, und die SLR-Wochenlösungen auf die SLR-TRF-Lösung transformiert werden. Abb. 2 zeigt die Zeitreihe für die z-Komponente

Dasselbe gilt für den Trend, der in den frühen Jahren der VLBI-Zeitreihe sichtbar ist. Es werden deshalb alle SLR- und VLBI-Beobachtungen für die Festlegung des ITRF-Maßstabes verwendet.

Nach der Zeitreihenanalyse werden die Eingangsdaten zu einer NGL je Beobachtungsverfahren kombiniert. Dabei werden Stationsgeschwindigkeiten als neue Parameter eingeführt und die aufgedeckten Diskontinuitäten

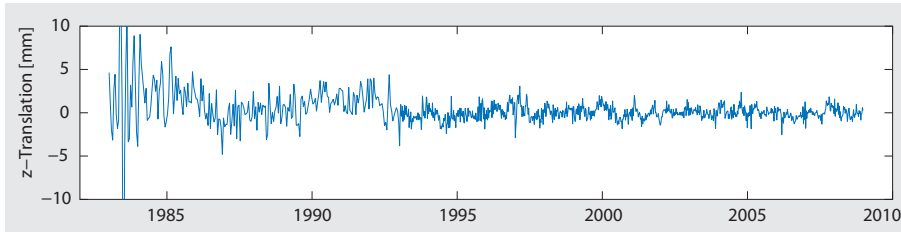


Abb. 2:
z-Komponente der Netztranslation der einzelnen SLR-Wochenlösungen gegenüber der SLR-Mehrjahreslösung

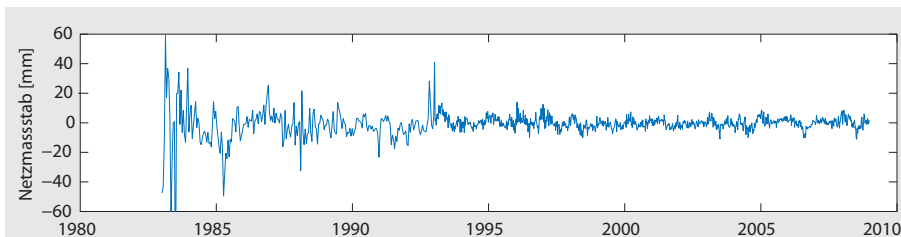


Abb. 3a:
SLR-Netzmaßstab geschätzt aus der Transformation der SLR-Wochenlösungen auf die SLR-Mehrjahreslösung

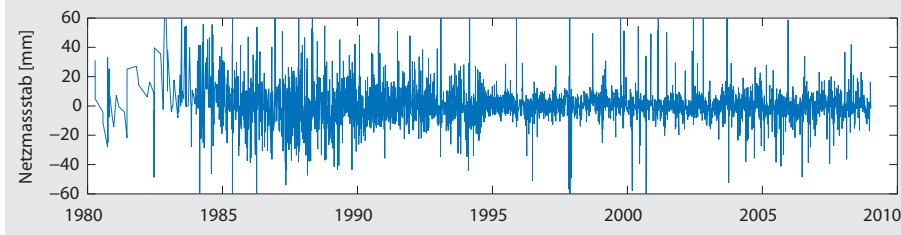


Abb. 3b:
VLBI-Netzmaßstab geschätzt aus der Transformation der VLBI-Sessionlösungen auf die VLBI-Mehrjahreslösung

Abb. 3: Zeitreihen des Netzmaßstabs für SLR und VLBI

der Translation des SLR-Netzes. In den frühen Jahren, in denen nur Beobachtungen zum Satellit LAGEOS 1 berücksichtigt wurden (Start von LAGEOS 2: 1992), ist ein periodischer Effekt erkennbar, dessen Ursache nicht bekannt ist. Um den Effekt dieser Systematik auf den Koordinatenursprung zu berechnen, wurde das Mittel der gesamten Zeitreihe mit dem Mittel über die Jahre 1993 bis 2008 verglichen. Die Differenz ist sehr klein (1.1 mm) und nicht signifikant. Der Effekt in den x- und y-Komponenten ist noch geringer. Es werden deshalb alle verfügbaren SLR-Beobachtungen zur Festlegung des Koordinatenursprungs verwendet.

Der Maßstab des ITRF wird aus den SLR- und VLBI-Beobachtungen bestimmt. Ebenso wie für den Koordinatenursprung werden auch für den Netzmaßstab die aus den Transformationen resultierenden Zeitreihen auf systematische Effekte hin untersucht. In Abb. 3 sind die Zeitreihen für den SLR- und den VLBI-Netzmaßstab dargestellt. Auch hier ist für SLR ein periodisches Signal zwischen 1984 und 1992 erkennbar. Die Auswirkung dieses Signals auf den Mittelwert ist jedoch nicht signifikant.

berücksichtigt. Die relative Gewichtung der Beobachtungsverfahren erfolgt mittels geschätzter Varianzkomponenten (VK). Der für die Berechnung der VK verwendete Ansatz ist in Seitz (2009) beschrieben.

3.2 Kombination der Beobachtungsverfahren

Die NGL der einzelnen Raumbeobachtungsverfahren definieren unabhängige Teilnetze. Eine Verknüpfung dieser Netze über Satellitenpositionen ist nicht möglich, weil die Satellitenbahnen nicht kombiniert werden. Eine terrestrische Verknüpfung gelingt aber auf den Stationen, auf denen Instrumente mehrerer Verfahren beobachten. Solche Stationen nennt man Kolokationsstationen (siehe Abb. 4). Da die Beobachtungen verschiedener Messinstrumente sich nicht auf einen gemeinsamen Referenzpunkt beziehen, werden Differenzvektoren (DV) zwischen benachbarten Instrumenten terrestrisch und/oder mithilfe von GPS gemessen.

Die DV werden idealerweise in der Kombination als zusätzliche Beobachtungen eingeführt. Allerdings treten teilweise Differenzen von mehreren Zentimetern zwi-

schen den aus den Raubeobachtungsverfahren berechneten Koordinatenunterschieden und den gemessenen DV auf. Ursachen für die Differenzen können systematische Unterschiede zwischen den Raubeobachtungsverfahren oder Ungenauigkeiten der DV sein. Abb. 5 zeigt die Differenzen für Kolokationen zwischen GPS und VLBI. Die Ergebnisse aus der Berechnung des ITRF2008D sind hier denen des ITRF2005 gegenübergestellt. Dabei zeigt sich,

dass für viele Stationen die Differenzen reduziert werden konnten. Wenn auch die DV nicht fehlerfrei sind, so kann die bessere Übereinstimmung doch auf die verbesserten Reduktionsmodelle (Tab. 1) zurückgeführt werden. Hier sind insbesondere die Verwendung absoluter anstelle relativer PCV im Fall von GPS und die Verbesserungen des Polzeitenmodells im Fall von VLBI zu nennen.

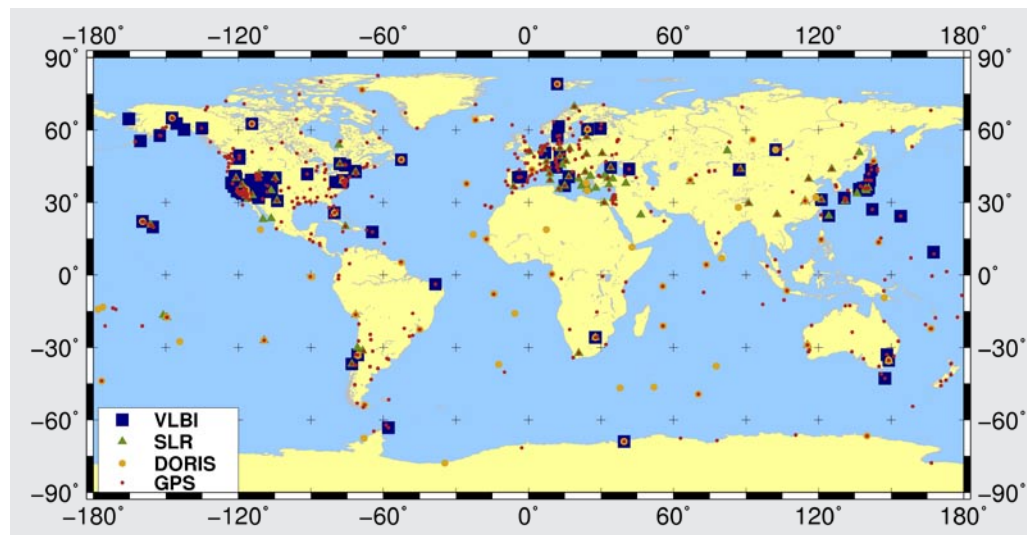


Abb. 4:
Globale Verteilung der
Kolokationsstationen
des ITRF2008D

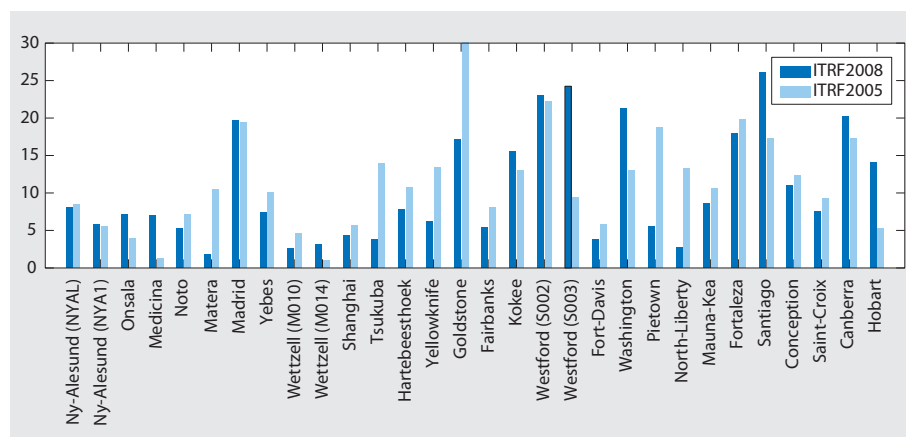


Abb. 5:
3D-Differenzen [mm] zwischen
den Koordinatenunter-
schieden, berechnet aus den Raum-
beobachtungsverfahren und den
Differenzvektoren für GPS-VLBI-
Kolokationen

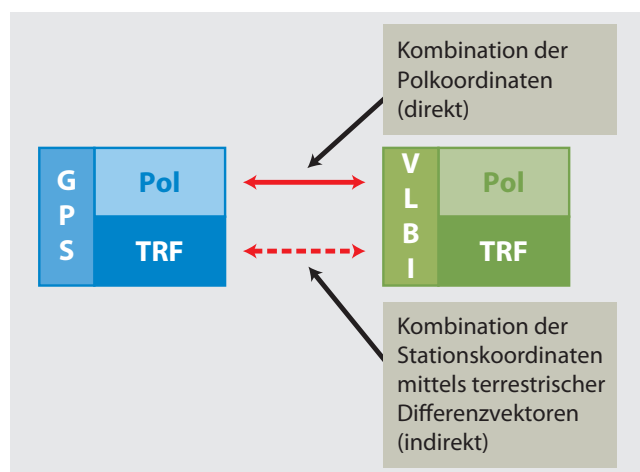


Abb. 6: Kombination der Orientierung über Stations- und Polkoordinaten, beispielhaft für die Kombination von GPS und VLBI

Die Genauigkeit und die Konsistenz des Referenzrahmens hängen stark von den ausgewählten DV ab. Ihre Auswahl wird nach zwei Kriterien optimiert:

1. Die Deformation der Stationskoordinatenetze infolge der Kombination soll minimal sein.
2. Die Konsistenz der Lösung soll maximal sein. Die Konsistenz wird beurteilt anhand der mittleren Differenz der Polkoordinaten, die sich ergibt, wenn nur die Stationskoordinaten zweier Verfahren, nicht aber die EOP, kombiniert werden. Es wird nun gefordert, dass die mittlere Differenz der Polkoordinaten minimal sein soll. Die Grundlage für diese Bedingung ist, dass die Kombination der Orientierung der Netze bezüglich der x- und y-Achse auf zweierlei Weise erfolgt: (a) durch die Kombination der Koordinaten und (b) durch Kombination der Polkoordinaten (siehe Abb. 6).

Bei sorgfältiger Auswahl der DV kann eine minimale Deformation der Netze zwischen 0.3 und 1.3 mm erreicht werden; die mittlere Poldifferenz ist kleiner als 0.03 Millibogensekunden (entspricht 1 mm auf der Erdoberfläche).

Die Geschwindigkeiten auf Kolokationsstationen werden kombiniert, wenn sie innerhalb ihres dreifachen mittleren Fehlers übereinstimmen.

Nicht alle EOP (Polkoordinaten (x, y) und deren zeitlich lineare Änderung (x', y') , UT1, LOD (engl.: *length of day*) und Nutationsparameter) können von den vier Raumbeobachtungsverfahren (gleich gut) bestimmt werden. Die EOP werden deshalb nur dann kombiniert, wenn keine Systematiken zwischen den einzelnen Verfahren auftreten. Für LOD weist die SLR-Lösung z.B. signifikante Perioden relativ zu GPS und VLBI auf, deren Ursache bisher nicht bekannt ist. Die SLR LOD wurden deshalb in der Kombination nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für x' und y' : Die aus GPS bestimmten Zeitreihen weisen Perioden von etwa 50 und 70 Tagen auf, die auf Defizite in der Modellierung des Strahlungsdrucks zurückgeführt werden (Hugentobler et al. 2005). Die Polgeschwindigkeiten wurden daher nur aus VLBI-Beobachtungen bestimmt. Tab. 4 zeigt, welche EOP in den ITRF2008D einbezogen wurden.

Tab. 4: EOP, die in den Eingangsdaten und im ITRF2008 enthalten sind. Für den ITRF2008D ist angegeben, ob alle verfügbaren Parameter kombiniert (✕) oder nur die aus V=VLBI und G=GPS geschätzten Parameter verwendet wurden.

	x	y	UT1	x'	y'	LOD	Nutation ψ	ϵ
GPS	✕	✕		✕	✕	✕		
SLR	✕	✕				✕		
VLBI	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
DORIS	✕	✕						
ITRF2008D	✕	✕	V	V	V	G,V	V	V

Die Festlegung des geodätischen Datums des ITRF2008D erfolgt entsprechend den Konventionen des IERS (IERS 2004):

- Der Koordinatenursprung liegt im Massenzentrum der Erde und wird aus SLR-Beobachtungen bestimmt.
- Die Längeneinheit ist das Meter (SI). Der Maßstab wird aus SLR- und VLBI-Beobachtungen realisiert.
- Die Orientierung wird durch eine *no net rotation*-Bedingung bezüglich des ITRF2005 bestimmt. Die zeitliche Änderung der Orientierung wird so festgelegt, dass das Netz gegenüber der festen Erde keine Rotation aufweist. Dies wird mittels einer *no net rotation*-Bedingung bezüglich des Plattenrotations- und Deformationsmodells APKIM2008 erreicht, das aus denselben geodätischen Beobachtungen wie der ITRF2008 berechnet wird (siehe Drewes 2009b).

4 Validierung der ITRF2008D-Lösung

Die Validierung des ITRF2008D umfasst interne Vergleiche mit den verfahrensspezifischen Lösungen zur Abschätzung der internen Genauigkeit. Weiterhin wurde ein Vergleich mit dem vorhergehenden ITRF, dem ITRF2005, vorgenommen.

Ein erster Vergleich mit der am IGN berechneten Lösung zeigt kleine Differenzen von wenigen Millimetern, was die hohe Genauigkeit des Rahmens bestätigt.

4.1 Vergleich des ITRF2008D mit den verfahrensspezifischen Lösungen

Tab. 5 zeigt die Translationen und die Unterschiede im Netzmaßstab, zwischen den verfahrensspezifischen Lösungen für SLR und VLBI und dem ITRF2008D. Die sehr kleinen Transformationsparameter zeigen, dass der aus SLR bestimmte Koordinatenursprung und der aus SLR und VLBI bestimmte Maßstab durch die Kombination nicht verfälscht wurden. Die mittleren Fehler der Transformation (RMS) bestätigen zudem, dass es nur zu einer geringfügigen Deformation der Netze durch die Kombination kommt.

Tab. 5: Translation (dtx , dty , dtz), Netzmaßstabsdifferenz ($d\mu$) und mittlerer Fehler (RMS) der Transformation zwischen der SLR bzw. der VLBI Mehrjahreslösung und dem ITRF2008D (Epoche 1.1.2000), getrennt für Koordinaten (K) [mm] und Geschwindigkeiten (G) [mm/a]. Für die Maßstabsdifferenz und deren zeitliche Ableitung werden die Werte in [mm] bzw. [mm/a] bezogen auf die Erdoberfläche angegeben.

		dtx	dty	dtz	$d\mu$	RMS
SLR	K	0.3	-0.1	0.4	0.1	1.30
	G	0.1	0.0	0.1	-0.1	0.41
VLBI	K				0.0	0.33
	G				0.1	0.07

4.2 Vergleich von ITRF2008D und ITRF2005

Auch wenn infolge der Verbesserung verwendeter Modelle Unterschiede zwischen ITRF2008D und ITRF2005 zu erwarten sind, spiegelt ein Vergleich doch die Konsistenz aufeinanderfolgender ITRF-Lösungen wider. Abb. 7 zeigt die Unterschiede in Translation und Netzmaßstab. Da die Beobachtungsverfahren unterschiedliche Genauigkeiten aufweisen, werden die Werte für jedes der Verfahren separat berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Übereinstimmung beider Referenzrahmen sehr hoch ist. Die Mehrzahl der Transformationsparameter nimmt Werte von umgerechnet kleiner als 2.5 mm an. Größere Unterschiede weisen die y-Komponente der Translation

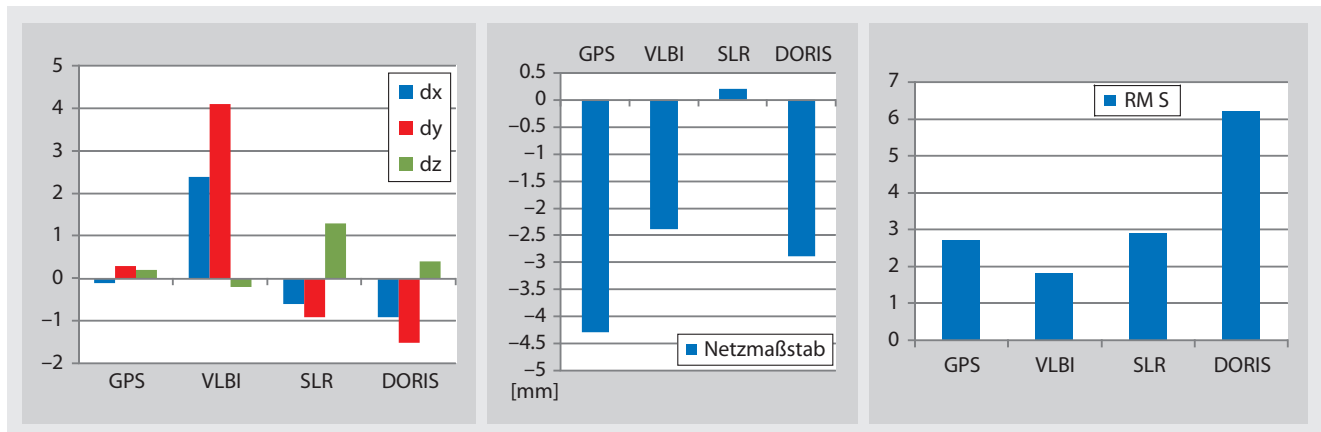


Abb. 7: Vergleich des ITRF2008D mit dem ITRF2005: Translationen (dx, dy, dz), Netzmaßstab und RMS der Koordinaten zur Epoche 1.1.2000

für VLBI und die Änderung des Netzmaßstabes für GPS, VLBI und DORIS auf. Die Ursachen für die berechnete Änderung des Netzmaßstabes sind auf die in Tab. 1 genannten Modellverbesserungen zurückzuführen. Dabei ist anzumerken, dass wegen der inhomogenen Stationsverteilung auch Änderungen der Stationskoordinaten, die nicht im Zusammenhang mit einer Änderung des Netzmaßstabes stehen (z.B. die Vereinheitlichung des Polgezeitenmodells), im Maßstabsparameter abgebildet werden können.

Die RMS-Werte in Abb. 7 geben an, wie gut die Stationskoordinaten – nach Reduktion der Unterschiede im geodätischen Datum – übereinstimmen. Für GPS, SLR und VLBI ergibt sich eine mittlere Übereinstimmung der Positionen von besser als 3 mm. Für DORIS sind die Differenzen deutlich größer, was darauf zurückzuführen ist, dass insbesondere bei diesem Verfahren die Datenanalyse in den letzten Jahren erheblich verbessert wurde.

Für die Geschwindigkeiten wurden absolute Übereinstimmungen zwischen 0.0 mm/a und 0.5 mm/a erhalten. Die RMS-Werte liegen bei 0.33 mm/a für GPS und VLBI, 0.8 mm/a für SLR und –1.5 mm/a für DORIS.

Damit zeigen sowohl die internen Vergleiche als auch der Vergleich mit dem ITRF2005 eine sehr hohe Konsistenz und Genauigkeit des ITRF2008D im Bereich von wenigen Millimetern.

5 Schlussbemerkungen

Der internationale terrestrische Referenzrahmen ITRF2008 wurde von zwei Kombinationszentren des IERS berechnet. Die am DGFI berechnete Lösung ITRF2008D wurde hier vorgestellt. Die verwendete Strategie basiert auf der Kombination bedingungsfreier (im Sinne des geodätischen Datums) Normalgleichungen. Ein wichtiger Schritt bei der Kombination der verschiedenen Beobachtungsverfahren ist die sorgfältige Auswahl der zur Kombination verwendeten terrestrischen Differenzvektoren, wobei Konsistenz und Genauigkeit des Referenzrahmens optimiert werden. Der Koordinatenursprung des ITRF2008D liegt im Massenzentrum der Erde und wird aus SLR-Beobachtungen realisiert. Der Maßstab wird aus den SLR- und VLBI-Beobachtungen bestimmt. Die Festlegung der Orientierung erfolgt mittels *no net rotation*-Bedingungen bzgl. des ITRF2005 und des Plattenrotations- und Deformationsmodells APKIM2008. Interne Vergleiche mit den verfahrensspezifischen Lösungen und externe Vergleiche mit dem ITRF2005 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Bereich von wenigen Millimetern. Der ITRF2008D ist aufgrund der langen Beobachtungsreihen und der Verwendung der aktuellsten Modelle einer der genauesten verfügbaren globalen Referenzrahmen.