

25 Jahre GPS – Stand und Perspektiven

Günter Seeber

ALLSAT OPEN

Fachtagung – Hannover

24. Juni 2004

Gliederung

- Einleitung
- Rückblick
 - Anfänge, Meilensteine
- Heutige Situation
 - Satellitenverfügbarkeit, Fehlerbudget, Aktive Netze
- Entwicklungslinien
 - Globale Vernetzung, Satellitensysteme, Ausgewählte Aspekte
- Schlussbetrachtung

Entwicklung der Genauigkeit von GPS von 1980 bis 2000

Ausgangspunkt: Transit Beobachtungen

3 bis 5 m absolut mit Broadcast Ephemeriden

1 m absolut mit Präzisen Ephemeriden

0.5 m relativ (Translocation)

Vision *Anderle* (1979 !!):

10 cm über 1000 km mit GPS

Voraussage *Stansell* (1983) für das Jahr 2000:

1 cm für Vermessungsaufgaben

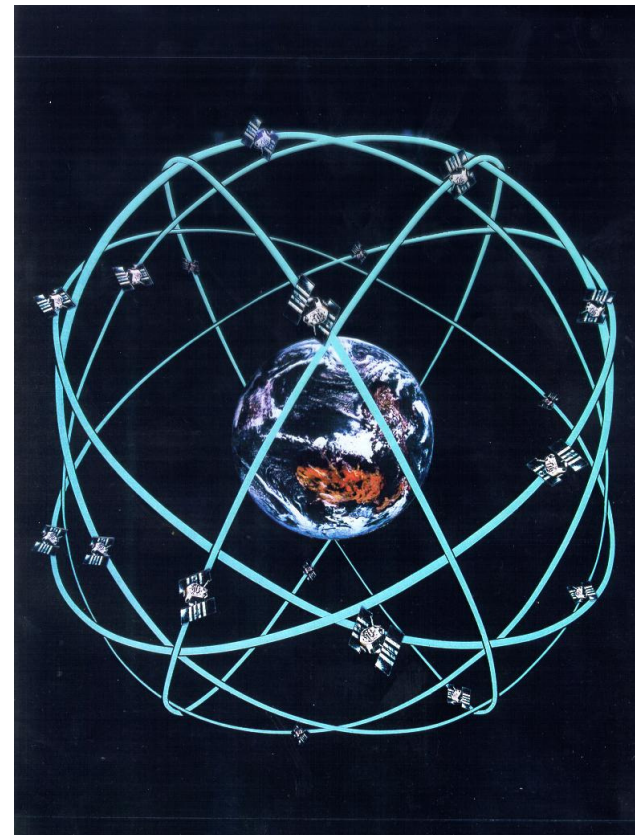
Zielsetzung des NAVSTAR GPS

Navigation System with
Time and Ranging
Global Positioning System

Genaue

- Echtzeitnavigation
- 4D Positionsbestimmung
- Geschwindigkeiten
- Zeitübertragung

wetterunabhängig
kontinuierlich verfügbar
globales Bezugssystem



Meilensteine GPS/GNSS (Auswahl)

Phase	System	Methoden	Projekte
bis 1980 Startphase	Block I Testkonstellation	Interferometrie Macrometer	Grundlegende Publikationen
1980 – 1990 Entwicklungsphase	Block II Satelliten	Auswertemodelle Mehrdeutigkeitslösung Kinematik, OTF Linearkombinationen	EUREF DÖNAV DREF
1990 – 2000 Einrichtungsphase	FOC (1995) GLONASS AS / SA	DGPS, RTK Vernetzung Fehlermodellierung	ITRF IGS SAPOS
Seit 2000 Anwendungs- und Weiterentwicklungs- phase	Block IIR-M / II-F GPS Modernisierung EGNOS GALILEO	Permanent Arrays Multiple Netze Integration von Techniken	?

GLONASS

Nominell:

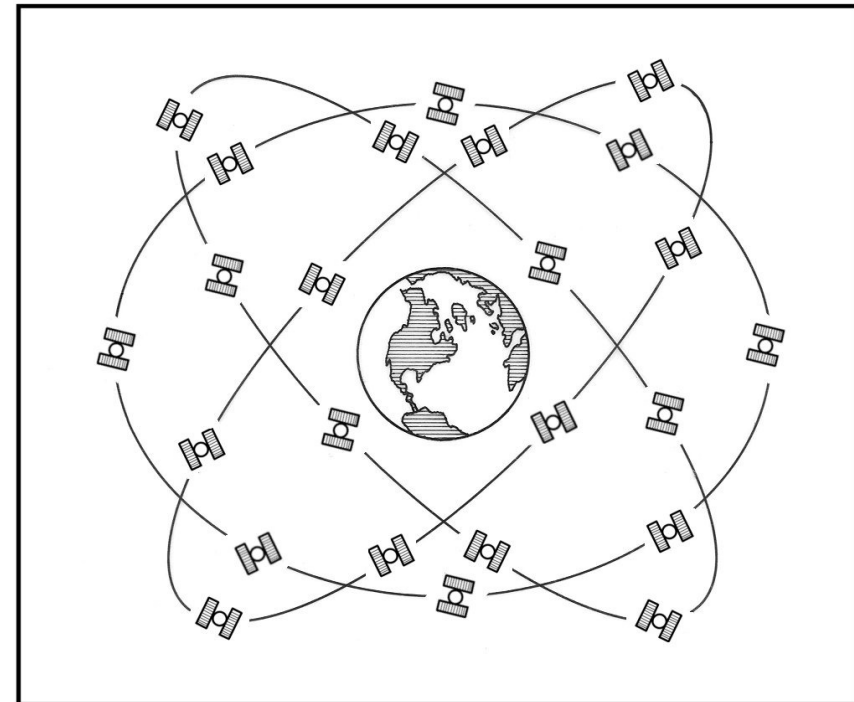
$3 \times 8 = 24$ Satelliten

Im Jahr 2004:

9 – 11 Satelliten in
2 Ebenen

Geplant:

Modifizierte Satelliten
GLONASS – M



Systemverfügbarkeit

Juni 2004

- 28 GPS Block II / IIa / IIR Satelliten
- 10 GLONASS Satelliten

Aktuelle und geplante Satellitenstarts (Stand 06/2004)

GPS IIR-11: 20. März 2004

GPS IIR-12: Juli 2004

GPS IIR-13: September 2004

GPS IIR M-1: Dezember 2004

Schlüssel zum genauen GPS/GNSS

- Beherrschung der Fehlereinflüsse
- Nutzung von Relativverfahren
- Redundante Beobachtungen

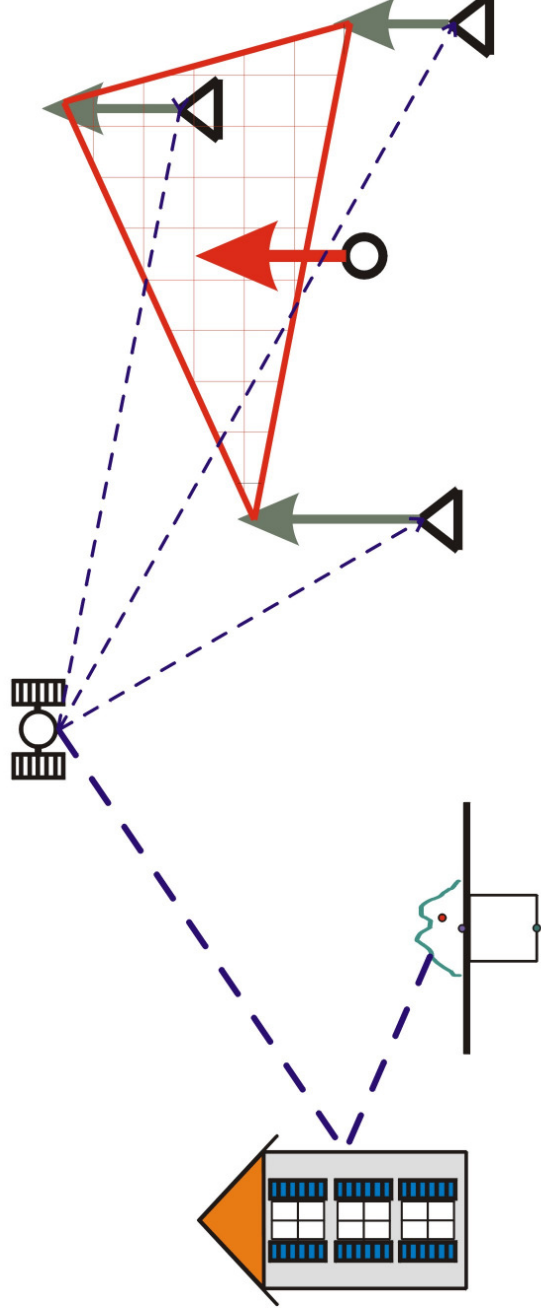
GPS-Fehlerhaushalt für die relative Positionsbestimmung



stationsabhängige Fehleranteile		entfernungsabhängige Fehleranteile	
Phasenzentrumsvariationen	Mehrwege-Effekt (Multipath)	Rauschen	Bahnfehler
mm .. 3 cm	mm .. 5 cm	<3 mm	0.5 .. (2) ppm
			Ionosphäre
			0.1 .. (50) ppm
			Troposphäre
			0.1 .. 3 ppm

Abhilfe: Kalibrierung

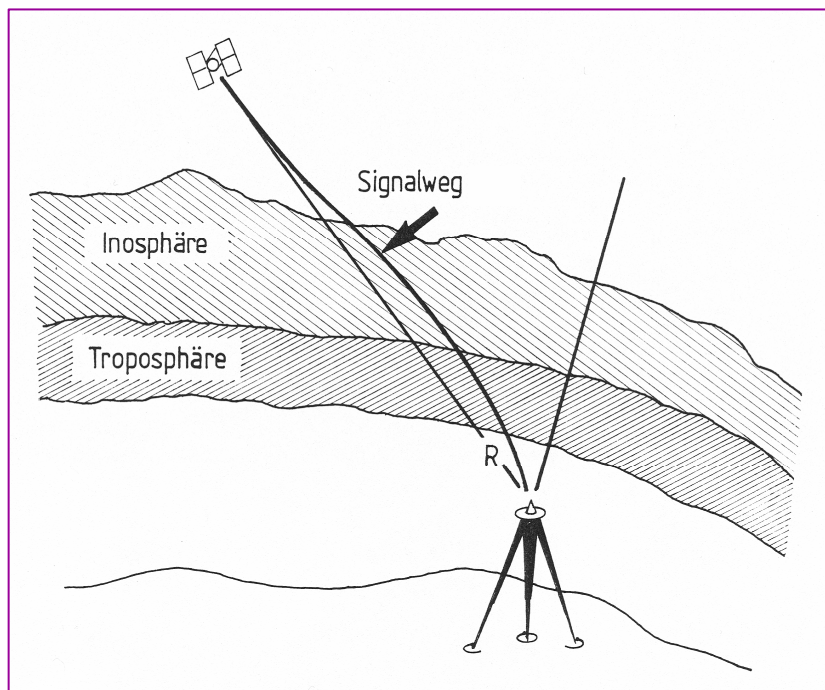
Abhilfe: Vernetzung



Bahnprodukte des IGS

Ephemeriden und Uhren	Genauigkeit	Alter	Aufdatierung	Häufigkeit
Broadcast	~260 cm / ~ 7 ns	Echtzeit		täglich
Ultra Rapid (prädiziert)	~25 cm / ~5 ns	Echtzeit	zweimal täglich	15 min. / 15 min.
Rapid	5 cm / 0.2 ns	17 Stunden	täglich	15 / 5 min.
Final	< 5 cm / 0.1 ns	~ 13 Tage	wöchentlich	15 / 5 min.

Signalausbreitung in Ionosphäre und Troposphäre



Ionosphäre

- dispersives Medium für Mikrowellen
- Geschwindigkeit der Signalausbreitung hängt von der Elektronendichte ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$) längs des Ausbreitungsweges ab
- Zweifrequenzmessungen für die Bestimmung der ionosphärischen Ausbreitungsverzögerung
- Effektive Reduktion durch Relativbeobachtungen

Troposphäre

- Erdnahe Atmosphäre ($< 40 \text{ km}$)
- Einflussparameter sind: Atmosphärendruck, Temperatur, Wasserdampfgehalt
- Hauptauswirkung auf die Höhenkomponente

Antennen Phasen Zentrum

Das elektromagnetische Phasenzentrum der Antenne hängt ab von

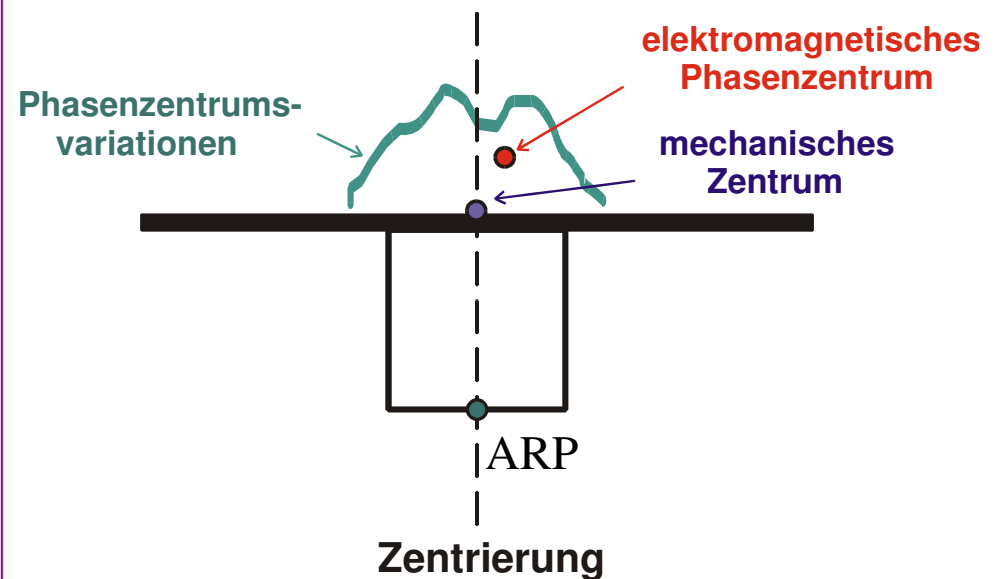
- Frequenz
- Azimut
- Elevation

des einfallenden Signals

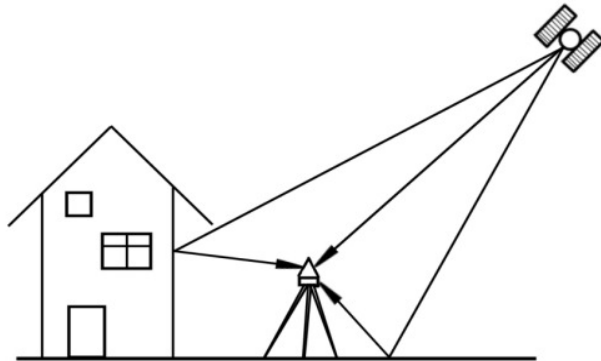
Die Position in Bezug auf den Antennenreferenzpunkt (ARP) muss bestimmt werden

- Offset
- PCV

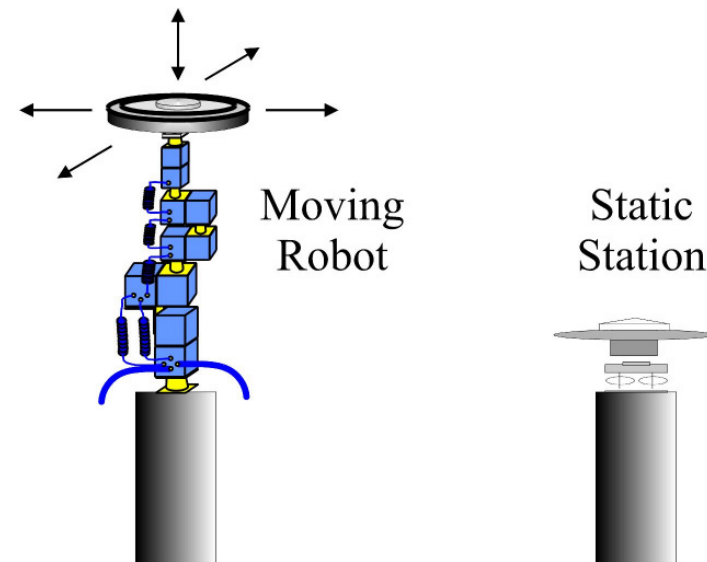
Insbesondere wenn unterschiedliche Antennentypen verwendet werden



Multipath Kalibrierung



Mehrwegeeffekte an
reflektierenden
Oberflächen



Kalibrierung von Referenzstationen

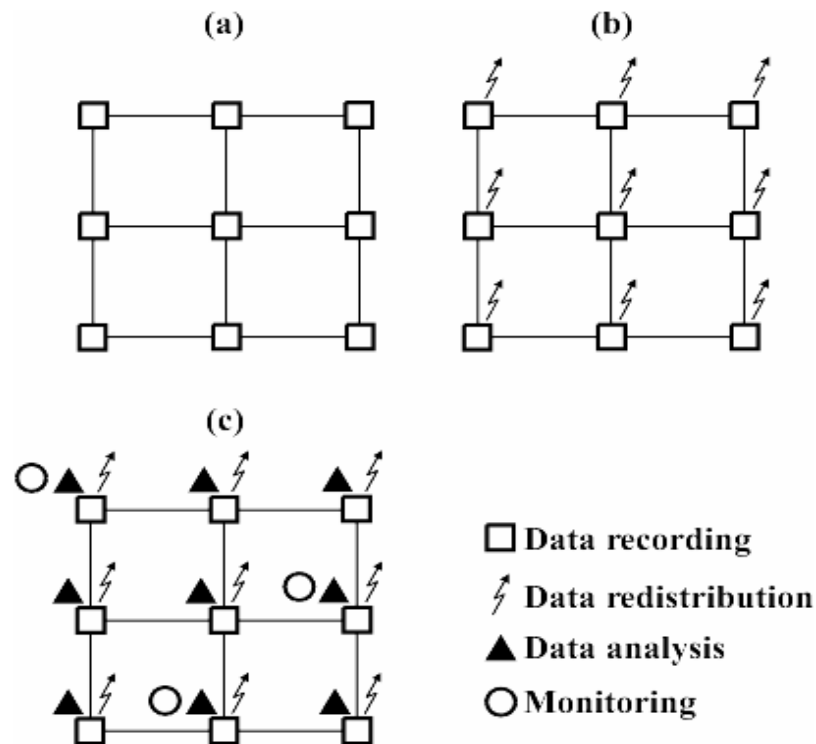
Verwendung von absolut kalibrierten Antennen.
Durch die Bewegung wird Multipath dekorreliert.
In doppelten Differenzen verbleibt Multipath der
festen Station.

Konzepte beim Differential GNSS

Zur Minimierung von entfernungsabhängigen Fehlereinflüssen werden Relativbeobachtungen durchgeführt

- (a) Nutzung von Daten einer oder mehrerer Referenzstationen für das Nachprozessieren
- (b) Nutzung von Positions- oder Streckenkorrekturen einer Referenzstation in Echtzeit (normales DGNSS)
- (c) Nutzung von Code- und Trägerphasendaten einer Referenzstation in Echtzeit (RTK, PDGNSS)
- (d) Nutzung von Daten aus einem Netz von Referenzstationen in Echtzeit

Konzepte permanenter Referenzstationsnetze



- (a) Datenaufzeichnung und spätere Verteilung an Nutzer durch den Betreiber
- (b) Übertragung von (Strecken) - Korrekturen an den Nutzer in Echtzeit von der nächstgelegenen Station
- (c) Vernetzung der Stationen, Datenanalyse, Korrektur des Fehlerzustandes und Übertragung an den Nutzer in Echtzeit

Ansätze bei aktiven Referenznetzen

Ziel: Die Dekorrelation der entfernungsabhängigen Fehler durch geeignete Vernetzungsalgorithmen überwinden.

Zwei Gruppen von Algorithmen:

Algorithmen im Beobachtungsraum

Es wird ein gewichtetes Mittel über alle Referenzstationen gebildet

Algorithmen im Zustandsraum (State Space)

Die individuellen Fehlerursachen werden identifiziert.

Grundsätzliches zur Vernetzung

Ausgangspunkt ist die Schätzung des Fehlerzustandes im Arbeitsgebiet durch Analyse der Daten eines Referenzstationsnetzes. Individuelle Anteile des Fehlerbudgets kommen unter anderem von

- Satellitenbahnen
- Satellitenuhren
- Signalverzögerungen
- Ionosphäre
- Troposphäre
- Empfängeruhren

Davon wird abgeleitet:

Zustandsrepräsentation durch ein vereinfachtes räumliches Modell

⇒ **Flächenkorrekturparameter (FKP)**

Zustandsprädiktion für die Näherungsposition des Rovers

⇒ **Virtuelle Referenzstationen (VRS)**

Einige Anforderungen an Referenzstationsnetze

- Hohe Datenqualität
- Keine Unterbrechungen des Dienstes
- Warnung bei unvermeidbaren Störungen

Aktuelle Herausforderungen:

- Zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung über große Entfernungen
- Zuverlässiger Datentransfer über große Entfernungen
- Deutliche Verringerung des Fehlerbudgets

Zielsetzung:

⇒ Zuverlässige 3D Positionsbestimmung mit 1 cm Genauigkeit über große Entfernungen in Echtzeit

Zwischenbilanz

- Ziel erreicht ?

z.B. : 1 cm, weltweit, jederzeit in Echtzeit

- Mögliche Mängel ?

Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Redundanz,
Genauigkeit (Höhe, Ingenieuranwendung)

- Welche Entwicklungslinien sind erkennbar ?

Entwicklungslinien

- Globale Vernetzung (Zustandsschätzung)
- Satellitensysteme (GPS, GLONASS, EGNOS, GALILEO)
- Ausgewählte Aspekte (Spezielle Anwendungen)

Zustandsüberwachung eines GNSS Netzes

Zielvorstellung

Die Daten eines Referenzstationsnetzes werden analysiert, um den Zustand (state) der individuellen Anteile des Fehlerbudgets in Echtzeit zu schätzen, vorherzusagen und darzustellen.

Der Rover verwendet entweder den vollständigen Zustandsvektor oder eine Teilmenge in geeigneter Darstellung.

- **Undifferenzierte Beobachtungen haben den Vorteil besserer Modellierbarkeit**
- **Für die Übertragung der Zustandsinformationen werden geeignete Standards benötigt**

Ein viertes Segment

Neben

**Raumsegment
Kontrollsegment
Nutzersegment**

gibt es als viertes Segment das

Aktive Netzsegment

Geplante Verbesserungen des GPS Systems

Zwei Initiativen:

- Accuracy Improvement Initiative (AII)
- GPS Modernization Initiative

Wichtige Maßnahmen:

- Ziviles Codesignal auf L2 \Rightarrow L2C
- 3. Zivile Frequenz \Rightarrow L5
- Genauere Broadcastbahnen

Daraus folgen: Verbesserungen in Signalqualität, Ionosphärenmodellierung, Mehrdeutigkeitslösungen, Messungen unter Bäumen und in Räumen, genauere Einzelmessung (SISRE unter 1.5 m)

Zeitplan für GPS Modernisierung

Erster Satellit mit dem 2. zivilen Signal (IIR-M)
⇒ IIR-M14: Haushaltsjahr 2004

Erster IIF Satellit mit L5 Signal:
Start: für Haushaltsjahr 2006 geplant

Planungen für Nachfolgesystem GPS III beginnen
Erster Start für 2010 – 2012 geplant

Galileo Zeitplan

- Entwicklung- und Validierung: 2001–2006

Start des ersten experimentellen Satelliten
als Teil des „Galileo System Test Bed“ (GSTB)
⇒ 2. Hälfte 2005

Validierung mit 4 operationellen Satelliten,
„In Orbit Validation“ (IOV) ⇒ Start 2005-2006

- Einrichtungsphase: 2006-2007
- Full Operational Capability (FOC): 2008

Integration von GPS und Galileo

Eigenschaft	GPS	Galileo	Kombination	Bemerkungen
Satelliten im Orbit	28 + 3	30 + 3	58 + 6	nutzbar: 15-25
Verfügbarkeit (Nutzer)	8 - 9	8 - 9	16 - 18	sehr gute Geometrie
Integrität	Schwach	Schwach	sehr gut	
Überdeckung	gut	gut	sehr gut	auch hohe Breiten
Nominales DOP	1 - 3	1 - 3	0.7 - 2	erhöhte Genauigkeit
Störanfälligkeit	gering	gering	sehr gering	
Zivile Frequenzen	1 - 3	1 - 5	2 - 8	Nutzerflexibilität
Kosten (relativ)	1	1	1.2	

25 Jahre GPS – Ende oder Anfang eines Weges?

