# Beschleunigte Teilchen schmelzen kontrolliert Aluminium

Voraussichtlich diesen Sommer findet für die Formel-E ein Strassenrennen in Zürich statt. Der Zürcher Stadtrat hat die entsprechende Bewilligung in der Zürcher Innenstadt für das erste Formel-E-Strassenrennen der Schweiz mit Auflagen erteilt.

Abb.: 1

Die Formel E ist die Königsdisziplin im Rennsport für Formelwagen mit Elektromotoren, welche weltweit auf Stadtkursen ausgetragen wird. Die Fahrzeuge mit Elektromotoren leisten maximal 220 kW (299 PS) und dabei ist die Höchstgeschwindigkeit auf 225km / h begrenzt.

Gleichzeitig sind diese Motorsportfahrzeuge (Abb. 1) bei der Entwicklung und Einführung zukünftiger Technologien eine wichtige Plattform mit spannenden Innovationen.

*Peter Schmidt, SwissBeam AG, 8964 Rudolfstetten*

Wenn am 10. Juni 2018 ein bedeutendes Stadtrennen in der Schweiz über die Bühne geht, ist auch eine kleine Firma aus Rudolfstetten – Friedlisberg mit ihrer Technik vom Start bis zum Ziel unterwegs.

Bei diesen Fahrzeugen besteht die Notwendigkeit in thermischen Prozessen Kühlungen vorzunehmen um die vorhandenen Einflüsse auf die umliegenden Baugruppen, beispielsweise elektronische Teile, zu reduzieren.

Gefordert ist ein prozesssicherer Kühler möglichst in Flachbauweise, der hinsichtlich seiner Dichtigkeit eine Langzeitstabilität besitzt und durch seine konstruktive Gestaltung eine möglichst effektive Kühlung sicherstellt. Hierfür werden Kühlplatten eingesetzt, die im Grundkörper (Stärke 12 mm) einseitig mit Kühlkanälen in Form einer Schnecke versehen sind. Die Kühlkanäle werden durch ein Deckblech (Stärke 2 mm) aus artgleichem Material verschlossen, damit ein flüssiges Medium darin strömen kann und somit ein geschlossener Kühlkreislauf besteht. Dank dieser Flachbauweise ist ein hochgradiger thermischer Wirkungsgrad sichergestellt.

Die Verbindung zwischen Grundkörper und Deckblech stellt hohe Anforderungen wegen der mechanischen und thermischen Belastungen in Form von Schub-, Zug- und Druckkraft an die Fügetechnologie. Kleben oder Löten kann hinsichtlich der prozessstabilen Dichtigkeit zu deutlichen Problemen führen. Das WIG-Verfahren bringt eine zu grosse Wärmeeinbringung und damit entsteht unter anderem ein hochgradiger Verzug der kompletten Schweissbaugruppe. Das Laserstrahl-Schweissen ist wohl in der Lage zur Versteifung der Deckplatte Überlappnähte auf den Deckblech zwischen den Kühlkanälen auszuführen, jedoch stellt sich die Frage wie bekommt man prozesssicher das erforderliche Schutzgas auch im Inneren des Kühlers zu den Fügespalten der Überlappnähte.

**Hersteller benötigen ein flexibles, leistungsstarkes sowie kostengünstiges Fügeverfahren.**

Nur das Elektronenstrahl-Schweissverfahren (EBW) ist als einziges Fügeverfahren in der Lage dieses breite Anforderungsspektrum komplett und wirtschaftlich abzudecken. Die Elektronenstrahlschweissung ist in der Lage Nähte zu bilden, welche die erforderlichen mechanischen und technologischen Gütewerte nachweisen. Dies gilt für Nähte, die sowohl im Bereich eines I-Stosses als auch für die notwendigen Blindnähte vorhanden sind.

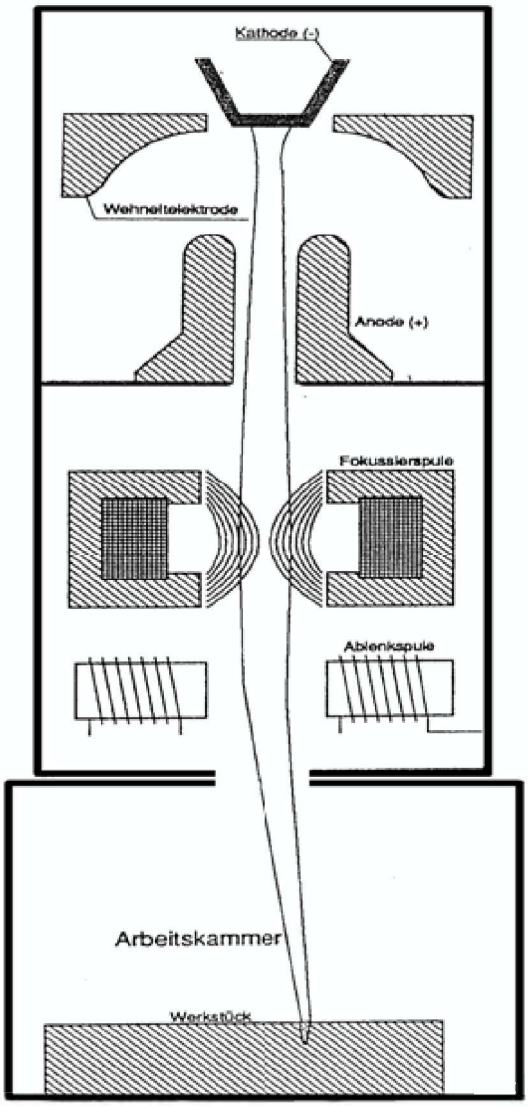

Abb.: 2

## Technik der Elektronenstrahlerzeugung

Der Elektronenstrahlerzeuger bildet zusammen mit der Hochspannungsversorgung als EB Generator eine eigenständige Einheit. Der Elektronenstrahlerzeuger generiert und steuert den Strahl nach dem Triodenprinzip (Abb. 2). Aus einer auf 2.500° C geheizten Wolframkathode werden negativ geladene Elektronen emittiert und durch Anlegen einer Hochspannung (bis 150 KV) zwischen Kathode und Anode auf ca. 2 / 3 der Lichtgeschwindigkeit in Richtung der zu verschweissenden Werkstücke beschleunigt. Eine Steuerelektrode zwischen Anode und Kathode steuert mit einer Differenzspannung von etwa 2000 V gegenüber der Kathode den Strahlstrom. Zwischen Strahlerzeugung und der Werkstückoberfläche wird der Elektronenstrahl im Vakuum mit Hilfe eines elektromagnetischen Linsensystems zu einem präzisen und feinen Brennfleck (Ø 0,1 mm) mit einer extrem hohen Leistungsdichte (bis zu 10 MW / $cm^2$) geformt. Die Wärme wird nicht wie üblich durch Wärmeleitung, sondern durch die Umwandlung kinematischer Energie der Elektronen erzeugt.

Ein wesentlicher Vorteil des Elektronenstrahlschweissens ist die evakuierte Arbeitskammer von $<10^{-4}$ mbar, die eine Bearbeitung von reaktiven Metallen zulässt, die sonst mit den Umgebungsgasen unerwünschte Verbindungen eingehen und ihre Eigenschaften verlieren würden. Das Verfahren ermöglicht das Schweissen verschiedenster Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Der Vorgang wird durch eine CNC gesteuerte Elektronenstrahl-Schweissmaschinen ermöglicht. Dadurch lassen sich Bauteile mit komplexen Strukturen schweissen, was dem Elektronenstrahlschweissen den Ruf eines sehr zuverlässigen Fügeverfahrens mit einer hohen Prozessreproduzierbarkeit bei hohen Schweissgeschwindigkeiten eingebracht hat.

## Anspruchsvolle Werkstoffwahl

Die Leichtbauweise führt bei dynamisch beanspruchten bzw. mobilen Konstruktionen zu geringen Massenkräften und geringfügigem Verschleiss bei hoher Betriebssicherheit. Die Werkstoffeigenschaften von Aluminium-Legierungen machen es somit zu einem begehrten Gebrauchsmetall mit nachfolgenden Vorzügen:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit bei magnetischer Neutralität.
- Niedriges spezifisches Gewicht bei gleichzeitig hoher mechanischer Festigkeit.
- Bei tiefen Temperaturen gute Zähigkeitseigenschaften ohne Versprödungserscheinung, bei naturharten Legierungen kfz-Gitterstruktur ohne Gitterumwandlung bei Abkühlung.
- Gute Zerspanbarkeit, woraus günstige Verarbeitungskosten resultieren.
- Beste Hitzebeständigkeit durch Oberflächenoxidbildung.
- Durch «Eloxieren» lassen sich Oberflächen elektrochemisch verdichten und damit eine widerstandsfähige Korrosionsschicht erzielen. Gleichzeitig kann eine farbliche Gestaltung vorgenommen werden.
- Hervorragend elektrisch leitend.

**Schweisseignung von Aluminium-Werkstoffe**

| Legierungsgruppe | Werkstoff Nr. | Kurzname DIN 1700 | Bez.nach EN | Schweiss-eignung | Porenbildung | Heissriss-neigung |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nichtaushärtbare Knetwerkstoffe | 3.0255 | Al 99,5 | EN AW-1050A | gut | | |
| | 3.0515 | AlMn 1 | EN AW 3103 | gut | | |
| | 3.3535 | AlMg 3 | EN AW-5754 | mäßig | | möglich |
| | 3.3547 | AlMg 4,5 Mn | EN AW-5083 | gut | geringe Mg-Ausdampfung | |
| | 3.3555 | AlMg 5 | EN AW-5019 | gut | geringe Mg-Ausdampfung | |
| aushärtbare Knetlegierungen | 3.2315 | AlMgSi 1 | EN AW-6082 | Bedingt | | hoch |
| | 3.1355 | AlCuMg 2 | EN AW-2024 | gut | | |
| | 3.4365 | AlZnMgCu 1.5 | EN AW-7075 | möglich | Zn- & Mg-Ausdampfung | möglich |
| nicht aushärtbare Knetlegierungen | 3.2581 | G-AlSi12 | EN AC 44200 | gut | | |
| | 3.2163 | G-AlSi, 9 Cu 3 | EN AC 46200 | gut | | |
| | 3.3561 | G-AlMg 5 | EN AC 51300 | gut | geringe Mg-Ausdampfung | |
| aushärtbare Gusslegierungen | 3.2371 | G-AlSi 7 Mg0.3 | EN AC 42100 | gut | | |
| | 3.3261 | G-AlMg 5 Si | EN AC 51400 | gut | geringe Mg-Ausdampfung | |
| | 3.1841 | G-AlCu 4 Ti | EN AC 21100 | schlecht | | hoch |
| | 3.2163 | GD-AlSi 8 Cu 3 | EN AC 46200 | möglich | sehr stark | |

Abb.: 3

Grundsätzlich sind beim EB Schweissen von Aluminium die metallurgischen Vorgänge im Schmelzbad weitgehend mit denen von konventionellen Schweissverfahren identisch. Um für die Kühlplatte den geeigneten Werkstoff auszuwählen, genügt es nicht allein die Festigkeitskennwerte zu ermitteln, sondern es sollte dabei auch die Betriebssicherheit, Zähigkeit, Porenbildung und Rissneigung des Werkstoffs (Abb. 3) berücksichtigt werden.
Auf Grund des Erstarrungsverhaltens beim EB-Schweissen gibt es Al-Legierungen die zu Heissrissen neigen. Die Probleme der heissrissanfälligen Aluminium-Legierungen sind nur über metallurgische Massnahmen, wie z.B. der Zugabe von Legierungselementen in Form von Zusatzmaterial wie Folien etc. zu lösen. Besser ist die konsequente Verarbeitung von AL-Werkstoffen mit guten Schweisseignungen.

Gerade die weit verbreiteten 5000er (AlMg) Legierungen zeigen mit dem Elektronenstrahlschweiss-Verfahren beste Eigenschaften.
Aluminiumlegierungen sind:

- 1000er (Al 99,5 %, niedrige mechanische Eigenschaften und gute Schweisseignung),
- 2000er (AlCu, Cu ist Hauptlegierungsanteil, schlechte Schweisseignung & Schweissfestigkeit),
- 3000er (AlMn, Mn ist Hauptlegierungsanteil, exzellente Schweisseignung & Schweissfestigkeit),
- 4000er (AlSi, Si ist Hauptlegierungsanteil, exzellente Schweisseignung & Schweissfestigkeit),
- 6000er (AlMgSi, diese Gruppe enthält Silicium und Magnesium Legierungen bei denen Bestandteile mit niedriger Siedetemperatur sich vorzeitig verflüchtigen).
- 7000er (AlZn, Zink kann in der Schmelze zu anderen Werkstoffzusammensetzung führen, was schlechte Eigenschaften auf die Schweissfestigkeit hat, schlechte Schweisseignung).

## Vorbereitung der Fügezone

In Zusammenarbeit mit einem Elektronenstrahlschweiss-Dienstleister werden vorhandene Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt einer EB-optimierten Fügestelle überarbeitet oder bei Neukonstruktionen schon im Entwicklungsstadium optimiert, um kostengünstige und qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen.

# Beschleunigte Teilchen schmelzen kontrolliert Aluminium

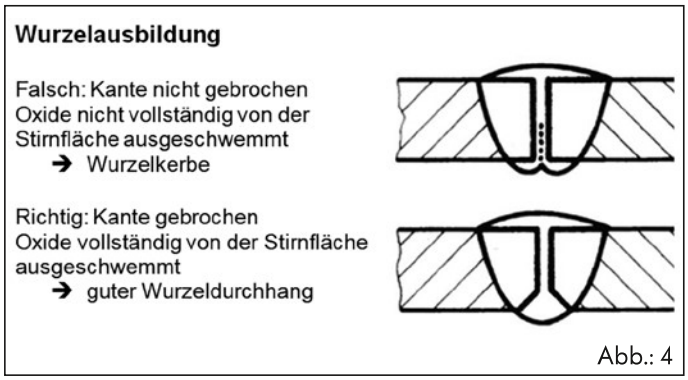

Abb.: 4

Eine ideale Nahtvorbereitung bedeutet: Die Fügespaltweite entspricht einem technischen Nullspalt und zur Vermeidung von Wurzelkerben sind die Kanten im Bereich der Wurzel zu brechen (Abb. 4).

In der Schweisspraxis können typische Fehler wie Wurzel- und Flankenbindefehler, starke Spritzerbildung, Rissbildungen oder unerwünschte Porenbildungen auftreten. Zur Vermeidung dieser Problematik ist zum einen eine besondere Vorbereitung der Bleche für das Schweissen von Aluminiumwerkstoffen erforderlich, das bedeutet ein ordentliches Entfetten der Oberfläche im gesamten Fugenbereich ist unumgänglich.

Aluminium produziert eine Oxidschicht, wenn es mit Sauerstoff in Verbindung kommt. Diese Oxidhaut ist nach Diamanten das härteste Material. Wenn die Oxidschicht beschädigt wird, erneuert sie sich selbständig. Aluminium-Oxide – $Al_2O_3$ sind schwerer als reines Aluminium und können im Schmelzbad nach unten sinken und damit Porosität oder Risse verursachen. Ebenso bindet das Oxid Feuchtigkeit was zu Poren führen kann. Beim Herstellen hochwertiger Schweissverbindungen soll zwischen dem mechanischen Bearbeiten und dem EB Schweissen keine beliebig lange Zeit (< 24 h) verstreichen. Ein Beizen der Oberflächen im Fügebereich vor dem Elektronenstrahlschweissen verbessert die Fliesseigenschaften und führt bei geminderter Porenzahl zu sehr guten Nahteigenschaften.

Das Elektronenstrahlschweissen ist ein ideales Verfahren um die Schmelzpunktunterschiede zwischen Oxidhaut (ca. 2050° C) und dem Grundwerkstoff (ca. 660° C) zu kompensieren. Die bei anderen Schweissverfahren störende hochschmelzende Oxidhaut kann mittels Elektronenstrahl leicht zerstört werden. Das Schweisstiefen-Spektrum ermöglicht Nahttiefen in Aluminium von 0,1 mm bis 300 mm in einem Arbeitsgang dank Tiefenschweisseffekt (Abb.5).

Die besondere Herausforderung beim Schweissen von Aluminium liegt darin, Gaseinschlüsse in der Schmelze und damit Bindefehler innerhalb der Konstruktion zu vermeiden. Desweiteren ist eine sorgfältige Wahl der Schweissparameter und vor allem die richtige Schweissreihenfolge zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit notwendig.

## EB Schweissen der Kühlkörper

Obwohl die meisten Aluminiumlegierungen gute Schweisseignungen besitzen, führen die werkstoffspezifischen Eigenschaften auch gegenüber anderen Metallen zu grundsätzlichen Verarbeitungsunterschieden. So tritt eine Neigung zur Porosität durch eingelagerte Wasserstoffverbindungen in der Oxidschicht auf. Die hohe Wärmeausdehnung führt hauptsächlich bei Dünnblechen zu starkem Verzug und die hohe Wärmeleitfähigkeit erfordert trotz des nur bei etwa bei 660° C liegenden Schmelzpunktes eine etwa gleich hohe Wärmeeinbringung wie bei Stahl.

Bei Schweissverbindungen (Abb.6) liegt die Frage nahe, mit welcher Festigkeit beziehungsweise Härte im Vergleich zu der des Grundwerkstoffs zu rechnen ist. Zumal die geschweissten Kühlplatten in der Antriebstechnik Kräften von bis 5 G im Rennbetrieb ausgesetzt sind.
Dabei spielt bei Aluminiumwerkstoffen der Unterschied zwischen nicht aushärtbaren und aushärtbaren Legierungen eine erhebliche Rolle. Kaltverfestigte (walzhart) und aushärtbare Aluminiumlegierungen verlieren in der schmalen Schmelzzone einen Teil ihrer Härte. Kaltauslagernde Legierungen erfahren nach dem Schweissen und anschliessenden längeren Lagern bei Raumtemperatur wieder einen Härteanstieg, der aber nicht an den Wert des unbeeinflussten Grundwerkstoffs herankommt.

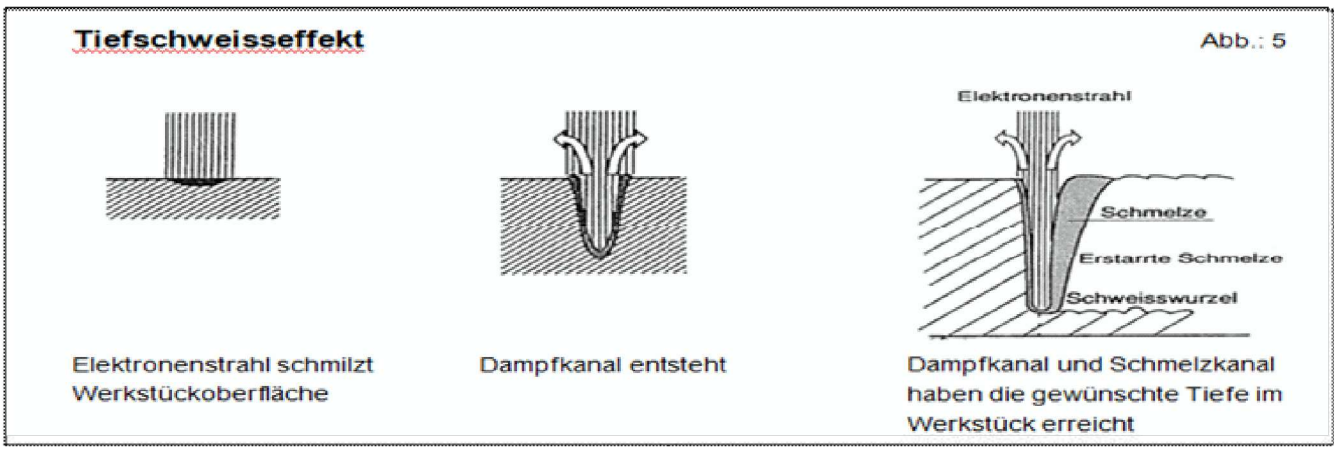

Abb.: 8

Im Gegensatz zu Stahl findet bei Aluminium mit seiner kfz-Atomgitterstruktur keine Gitterumwandlung bei der Abkühlung statt. Solch eine Gitterumwandlung im Stahl führt in der WEZ zu einem Aufhärtungsgefüge, dessen Härte ein Vielfaches des Grundwerkstoffes betragen kann. Dagegen erfolgt bei naturharten Aluminiumwerkstoffen nach dem Schweissen während der Abkühlung eine Aufhärtung beziehungsweise bei tiefen Temperaturen eine Versprödung.

Neben der schweissgerechten Konstruktion und der sorgfältigen Legierungsauswahl kommen oft noch zusätzlich spezielle Wärmebehandlungsverfahren, wie beispielsweise Vorwärmen oder verzögertes Abkühlen zum Einsatz. Bei grösseren Blechstärken wird ein Vorwärmen (Abb. 7) empfohlen: Kleinere Werkstücke können in einem Ofen vorgewärmt werden oder mit dem Elektronenstrahl prozesssicher vorgewärmt werden.

Die hohe Affinität des Schmelzbades zu atmosphärischen Gasen, insbesondere zu Wasserstoff, verstärkt die Gefahr einer erhöhten Porenbildung. Die Löslichkeit der eingeschlossenen Gase im Aluminium insbesondere in der Oxidschicht nimmt mit höherer Temperatur zu. Dies bewirkt, dass während des Schweissprozesses das Gas in die Schmelze diffundiert und da diese vom Rand her abkühlt, übersteigt in der Folge der Gasgehalt die Löslichkeitsgrenze und bildet Poren. Durch mehrmaliges Schweissen oder einem Einsatz einer Mehrbadtechnik kann eine Ausgasung des Wasserstoffs unterstützt werden, so dass die Poren verschwinden.

Bei Aluminium-Werkstoffen ist besonders darauf zu achten, dass während der Erstarrung der Schmelze keine durch Schrumpfbehinderung entstehenden Zugspannungen auftreten.

Die in der Lohnfertigung mit dem Elektronenstrahl geschweissten Kühlsysteme werden alle einer Dichtigkeitsprüfung in Form von einem He-Lecktest mit einer Leckrate $< 1 \times 10^{-8}$ mbar l / s geprüft. Dies bedeutet das innerhalb von 42 Jahren max. 1.5 Milliliter entweichen kann, was einem 1 / 10 von einem Esslöffel entspricht. So kann ein hohes Qualitätsniveau im Auslieferzustand mit einer ausserordentlichen Prozesssicherheit beim Einsatz der Kühlsysteme sichergestellt werden.

**Empfohlene Vorwärmtemperatur**

| Werkstoff | Materialstärke (mm) | max. Temperatur (°C) | max. Dauer (min) |
|---|---|---|---|
| AlMgSi0.5 | >7 | 180 | 60 |
| AlMgSi 1 | >10 | 200 | 30 |
| AlZnMgCu 1.5 | >6 | 150 | 30 |
| AlMg 4,5 Mn | >8 | 170 | 20 |

Abb.: 7

Seit 1952 werden mit beschleunigten Elektronen Metalle geschmolzen und 66 Jahre später beschleunigen im Renntempo faszinierende Elektroantriebe (Abb. 8) die Schweiz.

Abb.: 6

**Info.: info@swissbeam.ch, www.swissbeam.ch**

# Stoosbahn – die steilste Standseilbahn der Welt

## Stoosbahn – la funicolare più ripida al mondo

*Abb. 1: Die Kabine der neuen Standseilbahn mit automatischer Neigungsanpassung. (Quelle: Stoosbahn AG)*
*Fig. 1: Cabina della nuova funicolare, con compensazione automatica dell'inclinazione.*

Gefälle von bis zu 110 % haben sowohl für den Bau der Tunnel als auch für die Verlegung des Trassees innovative Lösungen erforderlich gemacht. Das Trassee wurde mit Hilfe einer mechanisierten Anlage erstellt, die binnen kürzester Zeit entwickelt, hergestellt und in Betrieb genommen wurde.

Pendenze fino al 110 % hanno richiesto soluzioni innovative sia per lo scavo delle gallerie sia per la posa del tracciato. Quest'ultimo è stato realizzato con un impianto meccanizzato concepito, fabbricato e messo in esercizio in tempi brevissimi.

*Text und Bild: Dr. sc. ETH Alberto Belloli, Masch.-Ing. Andrea Della Ca', International Welding Specialist (IWS), Masch.-Ing. Heinz Jenni / Übersetzung Zeitschrift Metall / René Pellaton*

Der Stoos ist ein kleines autofreies Berg- und Touristendorf auf einer Anhöhe über Schwyz und zählt nur rund 150 Einwohner. Der Tourismus ist für die Gemeinde Stoos, wie für die gesamte Zentralschweiz und im Besonderen den Kanton Schwyz, ein wichtiger Wirtschaftsfaktor. Die Hauptverbindung zwischen der Talsohle und dem Stoos ist eine Standseilbahn, die das ganze Jahr über den Personen- und Warentransport sicherstellt. Die Zulassung für die bestehende, vor über 80 Jahren gebaute Standseilbahn konnte leider nicht mehr erneuert werden. Das Fehlen einer ganzjährigen Verbindung mit dem Dorf würde aber den Tourismus in der Region gefährden. Deswegen war es unbedingt notwendig, das Dorf mit einer neuen Standseilbahn auszustatten.

Stoos è un paesino di montagna nel Canton Svitto e conta soltanto 150 abitanti. Ovviamente, come del resto è il caso in tutta la Svizzera Centrale e in particolare nella regione di Svitto, anche per Stoos il turismo rappresenta un importante fattore economico. Il collegamento principale tra il fondovalle e Stoos è garantito da una funicolare che assicura tutto l'anno il trasporto di persone e di merci. La concessione per la funicolare esistente, realizzata più di ottant'anni fa, non può purtroppo più essere rinnovata. La mancanza di un collegamento al villaggio durante tutto l'anno metterebbe in pericolo la vocazione turistica della regione. Per questo motivo è indispensabile che il villaggio si doti di una nuova funicolare.

*Abb. 2: Längsschnitt der neuen Standseilbahn, welche die Talsohle mit dem Stoos verbindet.*

*Fig. 2: Sezione longitudinale della nuova funicolare che collega il fondovalle a Stoos.*

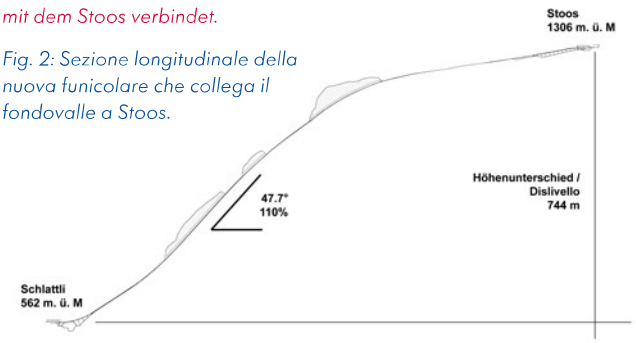


*Abb. 3: Anlage für den mechanisierten Trasseebau. Die gelb markierten Komponenten sind in Übereinstimmung mit dem Seilbahngesetz entwickelt und hergestellt worden.*

*Fig. 3: Impianto meccanizzato per la posa del tracciato. Le componenti evidenziate in giallo sono state progettate e realizzate in conformità alla Legge sugli impianti a fune.*