



5G-ACIAホワイトペーパー

5G-ACIA 報告書産業用5Gユースケースにおけるビジネス価値と投資回収の算定

5G Alliance for Connected Industries and Automation

1 概要

5Gの技術的成熟度と、5G技術に基づく産業アプリケーションの技術的成熟度は、着実かつ段階的に向上していますが、製造業関係の企業は依然としてこの技術の導入に慎重な姿勢を示しています。この慎重さの理由としてよく挙げられるのが、5G技術を導入することで得られる技術的・経済的な付加価値に対する不確実性です。

本ホワイトペーパーでは、この課題に対処するため、産業用5Gのユースケースにおけるビジネス価値を推定するための手法を紹介します。本手法は、5Gの活用によって達成されるべき技術的・経済的な目標に基づいています。各目標の達成度は、個別の主要性能評価指標 (KPI: Key Performance Indicators)に基づいて定められたKPI算出式によって評価されます。KPI算出式の各構成要素については、5Gの利用によるその構成要素への想定影響が考慮され、KPIに対する5Gの影響を見積もることが可能になります。本手法の基本原則は、特定のユースケースにおいて5Gの活用によって得られるユーザーの利益を考慮することです。推定値を用いることで、さまざまな産業用5Gユースケースに広く適用可能となり、製造業の環境における5Gのビジネス価値に関する評価ベースを導き出すことができます。

また、本手法の基本原則を説明するため、本手法を以下の3つの代表的なユースケース例に適用しています。一つ目は、AGV(自動搬送車)を用いた輸送を対象としたインテラロジスティクス(構内物流)の事例です。二つ目は、5Gを活用してミーリング(フライス加工)工程のインライン制御を改善する事例です。三つ目は、自動車OEMによって提供されたもので、自動車製造施設における自動バレーパーキング(自動駐車サービス)ソリューションの導入に焦点を当てたものです。各ユースケースにおいて、既存の課題に取り組むために5Gが活用されており、技術の導入によって得られる(潜在的な)利益が、上述のビジネス価値を推定するための手法を用いて算出されています。

5G-ACIAについて

5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA) は、産業分野における5Gに関する技術的、規制的、ビジネス的な側面について、議論・評価を行うための中心的かつ国際的なフォーラムとして設立されました。このアライアンスは、オペレーショナル・テクノロジー (OT) 業界(産業オートメーション企業、エンジニアリング企業、生産システムメーカー、エンドユーザーなど)、ICT業界(半導体メーカー、ネットワークインフラベンダー、モバイルネットワーク事業者など)、学術機関、研究機関、その他関連するプレイヤーを含む、産業界全体のエコシステムとすべての関係者グループを反映しています。5G-ACIAの最も重要な使命は、5Gの技術およびネットワークが、産業分野において可能な限り最適に適用されることを確保することです。また産業分野の利害やニーズが、5Gの標準化や規制において適切に考慮されるようにし、進行中の5Gの技術開発が産業分野に理解され、効果的に引き継がれることです。

2 目次

1	概要	2
2	目次	3
3	はじめに:このホワイトペーパーを作成した背景と目的	4
4	開発された評価モデルの説明	4
5	事例による計算	9
5.1	AGV ユースケース	9
5.2	ミーリング ユースケース	12
5.3	自動車ユースケース	15
5.4	現時点での結論	19
6	まとめと展望	19
7	略語一覧	20
8	参考文献	20
9	5G-ACIA会員企業	22

3 はじめに：このホワイトペーパーを作成した背景と目的

多くの製造業の企業が、製造現場における無線通信技術の価値を認識している一方で、業界における5Gの導入率は依然として比較的低い水準にとどまっています。Bitkomの調査によると、回答企業の半数以上が、5G技術の経済的な利点に関する透明性の欠如を導入に慎重な理由として挙げています^[1]。本ホワイトペーパーは、この課題に対処するために作成されました。主な目的は、製造業において5Gを活用したユースケースを導入することで得られるビジネス価値を評価するための実践的な手法を提示することです。このホワイトペーパーは、5G-ACIAのパートナーによって実施された複数の研究プロジェクトに基づいています^{[2]、[3]、[4]参照}。

この評価手法の開発において中心となる原則は、「精度」と「汎用性」のバランスを取ることです。これまでにも、さまざまなアプリケーション領域における5Gを活用したユースケースのビジネス価値を定量化する手法が開発されてきました。しかし、既存のアプローチには、特定のユースケースに焦点を当てすぎているという大きな欠点があります。

た。これは、個々のユースケースやアプリケーションの評価には有効ですが、他のケースへの応用が難しく、結果として5G技術の業界全体への普及を妨げる要因となっています。本ホワイトペーパーで提示する評価手法では、製造環境における5Gを活用したユースケースの導入によって得られる利点を、推定に基づいて評価する方法を採用しています。

さらに、この手法のもう一つの重要な原則は、「エンドユーザーへの価値の提供」に焦点を当てている点です。産業分野における5Gの普及を促進するためには、エンドユーザーへの価値提案が極めて重要です。

本ホワイトペーパーは以下の構成となっています。まず、開発されたモデルとその基礎となる手法について詳細に説明します。次に、適用された手法を用いた計算例を提示します。最後に、結果に対する重要な考察と、今後の展望について述べます。

4 開発された評価モデルの説明

この評価モデルの開発の主な目的は、関心を持つ企業が産業用5Gユースケースによって得られるビジネス価値を評価できるようなソリューションを提供することです。そのためには、ビジネス価値をエンドユーザーの視点から捉えることが重要です。なぜなら、実際に製造施設で技術を導入するのはエンドユーザーだからです。この目的のために、評価の基準として技術経済的な目標が設定されています。評価における中心的な問いは、「エンドユーザーが追求する技術経済的な目標に対して、5Gの活用がどのような影響を与える可能性があるか？」というものです。図1では、開発された評価モデルの基本原則が示されており、「生産性」が技術的目標の一例として挙げられています。

このモデルは段階的なアプローチに従っており、その概要是表1と図1で示されています。最初のステップでは、対象となるユースケースの技術的な説明が作成され、製造環境においてユースケースを実行するための運用手順を記述した評価シナリオが詳細に示されます。

産業用5Gユースケースのビジネス価値を評価し、投資収益率(ROI: Return On Investment)を算出するためには、競合する(従来の)技術や手作業による実装と、5Gによる実装との比較が必要です。そのためには、競合技術(例:4G/LTE-Aや手作業による実装)と5Gによる実装の両方について、主要性能評価指標(KPI)を設定する必要があります。5Gの技術的な利点と、それが各KPIに与える影響を考慮することで、競合技術と比較した場合の5Gの全体的な利点を定量化することが可能になります。

例えば、AGV（自動搬送車）ユースケースにおける「納期遵守率(OTD: On-Time Delivery)」というKPIを評価する場合、OTDの式における分子（納期通りの顧客注文数）と分母（総顧客注文数）に対して、5Gがどのような影響を与えるかを推定する必要があります。5Gには、多数のデバイスや機器を同時にネットワークに統合できる能力(mMTC:Massive Machine Type Communications)があるため、通信参加者が増加しても、より効率的にイントラロジスティクス（構内物流）が可能であり、その結果として納期通りの顧客注文数が増加すると推定されます。

図1: 評価モデルの基本原則

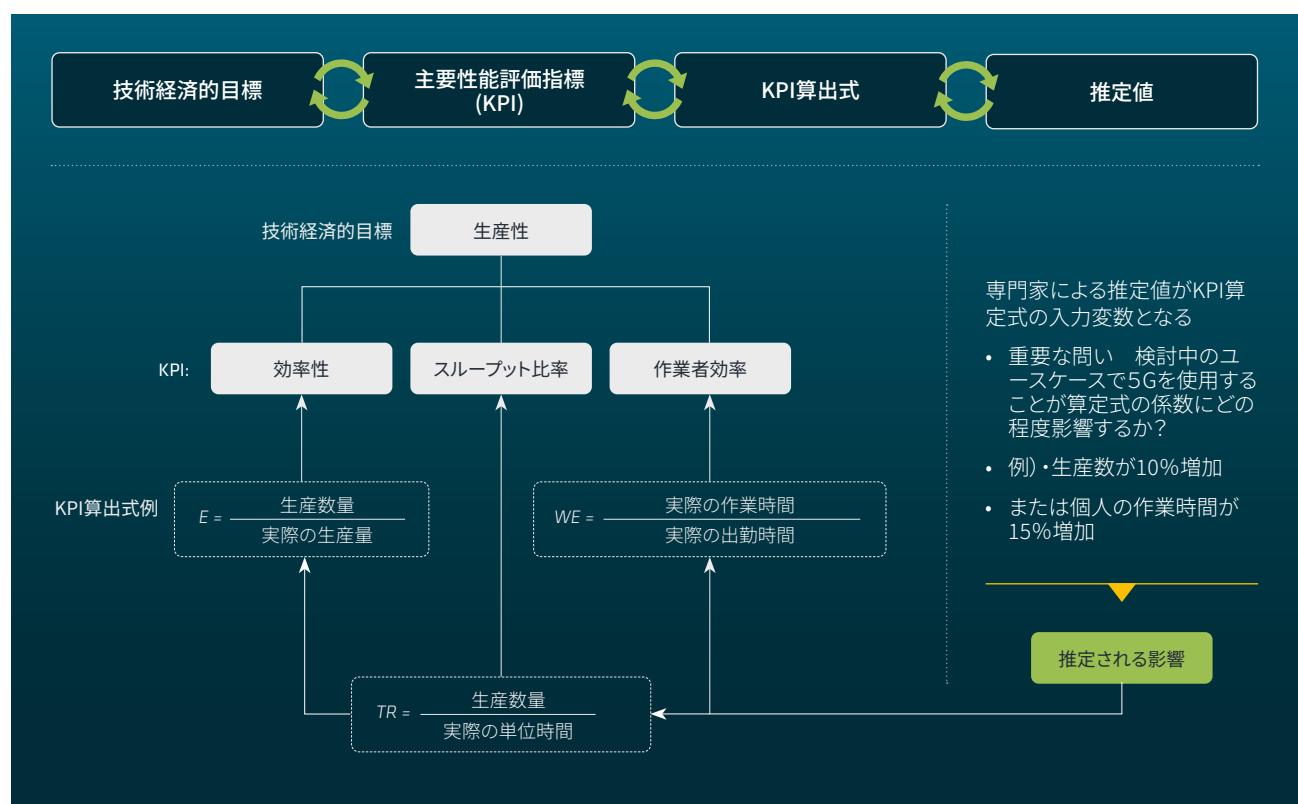


表1: モデル活用のための段階的アプローチの概要

ステップ / 名称	説明
ステップ 1 – アプリケーション仕様	対象となるアプリケーションの技術的な説明
ステップ 2 – 5G導入目標の選定	アプリケーションの導入によって達成すべき目標の選定
ステップ 3 – KPIの推定と計算	各KPIについて個別の推定値や計算を準備し、全体的なKPIの推定値を算出
ステップ 4 – 目標の評価	5G導入によって達成された全体的な影響を計算

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

次のステップでは、ユースケースの導入と適用によって達成すべき技術経済的目標が選定されます。技術的および経済的な様々な目標が、既に過去の研究活動において特

定されています。これらの目標の一覧を表2および表3に示されています。

表 2: 5G活用のユースケース導入における技術的目標 [5], [3], [6]

技術的目標	説明	主要性能評価指標 (KPI)
柔軟性	1つの製造システムで異なる部品を処理できる能力	<ul style="list-style-type: none"> 機械の柔軟性 (MF) 段取り比率 (SUR)
モビリティ	工場内で物体を移動・交換できる能力	<ul style="list-style-type: none"> マテリアルハンドリングモビリティ (MHM) 納期遵守率 (OTD) スペース生産性 (SP)
生産性	一定期間内の投入単位あたりの出力量 (生産効率も含む)	<ul style="list-style-type: none"> 有効性 (E) スループット比率 (TR) 作業者効率 (WE)
品質	生産工程の成果物が要求を満たしている度合い	<ul style="list-style-type: none"> 初回合格率 (FPY) 品質比率 (QR) 手直し率 (RR) 廃棄率 (SR)
安全性	システムが自身や作業者を危害や事故から守る能力	<ul style="list-style-type: none"> 事故率 (AR) 平均故障間隔 (MTBF) 平均復旧時間 (MTTR)
持続可能性	製品の製造が非汚染プロセスによって達成される度合い	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮空気消費比率 (ACR) 電力消費比率 (ECR) ガス消費比率 (GCR) 水消費比率 (WCR)
稼働率	R実際に使用された加工時間と理論上利用可能な時間の比率	<ul style="list-style-type: none"> 割当効率 (AE) 可用性 (A) 技術効率 (TE) 稼働効率 (UE)

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

表3: 産業用途における5Gの経済的目標の概要

経済的目標	説明
正味現在価値 (NPV)	将来のキャッシュフローを、特定の割引率で現在価値に割り引いて計算すること
投資収益率 (RoI)	投資によって得られる利益を、その投資コストと比較して収益性を計算すること
運用費用 (OpEX)	事業運営に伴い継続的に発生する費用を把握すること
設備投資 (CapEX)	一定期間にわたり利益をもたらすと期待される資産を取得するための投資コスト

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

技術的な目標に加えて、5Gを活用したユースケースを導入することによる経済的な利点を評価するための経済的目標も定義されています。投資の収益性を評価するためには、正味現在価値 (NPV: Net Present Value)、投資収益率 (RoI: Return on Investment)、運用費用 (OpEx: Operational Expenditure)、および設備投資 (CapEx: Capital Expenditure) が使用されます。これらの経済的目標は表3にまとめられています。

第3ステップでは、KPIの推定と計算が行われます。技術経済的な目標を選定した後、それに関連する主要性能評価指標 (KPI) が選ばれます。図4では、技術的目標の一例として「生産性」の選定例が示されています。生産性をどの程度向上させられるかは、「有効性」「スループット比率」「作業者の効率性」などの関連するKPIの計算によって定義されます。

各KPIには、具体的な数値を算出するための基本的な(汎用的な)数式が定義されています。精度と汎用性のバランスを取るという原則に従い、このモデルでは、数式の各構成要素に対して推定値を用いてKPIの値を算出します。ここでの重要な問い合わせ、「対象となるユースケースにおいて、5Gの活用が数式の係数にどの程度の影響を与えるか?」という点です。この問い合わせには、ユースケースに深い理解を持つ業界の有識者が、5Gが全体の性能を定義する個々の構成要素に対して、どのような影響を与えるか、専門的な見解から推定する必要があります。

表4には、事前に定義された技術的目標、それに関連するKPI、およびKPIの推定ベースの計算に使用される汎用的な数式がまとめられています。

表4: KPI計算のための目標・KPI・算定式

技術的目標	主要性能評価指標 (KPI)	算定式
柔軟性	・機械の柔軟性 (MF)	$MF = \frac{\text{潜在的な製品バリエーション数}}{\text{機械台数}}$
	・段取り比率 (SUR)	$SUR = \frac{\text{実際の単位セットアップ時間}}{\text{実際の単位処理時間}}$
モビリティ	・マテリアルハンドリングモビリティ (MHM)	$MHM = \frac{\text{システムがサポートする経路数}}{\text{総経路数}}$
	・納期遵守率 (OTD)	$OTD = \frac{\text{納期通りの顧客注文数}}{\text{総顧客注文数}}$
	・スペース生産性 (SP)	$SP = \frac{\text{生産エリア-修理工場}}{\text{生産エリア}}$
生産性	・有効性 (E)	$E = PRTI * \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の生産時間}}$
	・スループット比率 (TR)	$TR = \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の単位実行時間}}$
	・作業者効率 (WE)	$WE = \frac{\text{実際の作業時間}}{\text{実際の出勤時間}}$
品質	・初回合格率 (FPY)	$FPY = \frac{\text{初回合格品数量}}{\text{検査数量}}$
	・品質比率 (QR)	$QR = \frac{\text{良品数量}}{\text{生産数量}}$
	・手直し率 (RR)	$RR = \frac{\text{再加工数量}}{\text{生産数量}}$
	・廃棄率 (SR)	$SR = \frac{\text{廃棄数量}}{\text{生産数量}}$
安全性	・事故率 (AR)	$AR = \frac{\text{事故件数}}{\text{実際の出勤時間}}$
	・平均故障間隔 (MTBF)	$MTBF = \frac{\text{故障間隔時間}}{\text{故障影響数+1}}$
	・平均復旧時間(MTTR)	$MTTR = \frac{\text{復旧時間}}{\text{総復旧回数}}$
持続可能性	・圧縮空気消費比率 (ACR)	$ACR = \frac{\text{圧縮空気消費量}}{\text{生産数量}}$
	・電力消費比率 (ECR)	$ECR = \frac{\text{電力消費量}}{\text{生産数量}}$
	・ガス消費比率(GCR)	$GCR = \frac{\text{ガス消費量}}{\text{生産数量}}$
	・水消費比率 (WCR)	$WCR = \frac{\text{水消費量}}{\text{生産数量}}$
稼働率	・割当効率 (AE)	$AE = \frac{\text{実際の単位稼働時間}}{\text{計画単位稼働時間}}$
	・可用性 (A)	$A = \frac{\text{実際の生産時間}}{\text{計画単位稼働時間}}$
	・技術効率 (TE)	$TE = \frac{\text{実際の生産時間 (APT)}}{\text{APT+実際の単位遅延時間}}$
	・稼働効率 (UE)	$UE = \frac{\text{実際生産時間}}{\text{実際の単位稼働時間}}$

PRTI: planned runtime per item

第4ステップ(最終ステップ)では、目標の評価が行われます。このステップでは、5Gの導入による全体的な影響を算出し、それを解釈します。これにより、5Gの活用によって達成可能な価値を推定に基づいて計算することが可能になります。

モデルの基本的な仕組みの紹介に続いて、次の章では、産業分野における3つのユースケースの応用例を用いて、モデルとその機能についてさらに詳しく説明します。

5 事例による計算

このセクションでは、開発されたモデルを用いた計算例を示し、本手法の適用可能性を明らかにします。ここで提示される数値はあくまで例であり、本手法の適用可能性を示すことを目的としています。この章は、まず[3]で紹介されたAGV(自動搬送車)ユースケースの分析から始まります(第5.1章)。次に、第5.2章では、[4]で紹介されたミーリング(フライス加工)ユースケースを分析します。第5.3章では、2024年第4四半期に、5G-ACIAのWG5メンバーと自動車OEMチームとの複数回の個別会議を通じた協業により分析されたユースケースが紹介されます。

って、本分析では、モビリティ、生産性、安全性の3つを目標として選定しています。

ステップ3: KPIの推定と計算

目標として「モビリティ」「生産性」「安全性」が選定されたことを踏まえ、表5に記載されたKPIとそれに対応する数式を用いて、AGVユースケースの評価を行います。

5.1 AGV ユースケース

ステップ1: アプリケーション仕様

この分析は、集中型AGV(自動搬送車)制御システムの導入を対象としています。製造環境内で稼働するAGVの全車両を、単一の中央集約型の5Gを活用した通信ネットワークによって制御する事例です。また、5Gの比較対象となる通信技術として4Gが選定されています。

ステップ2: 5G導入目標の選定

5Gを活用したAGVのユースケースにより達成を目指す目標には、モビリティ、生産性、安全性の向上が含まれます。より正確かつ直接的なAGVの制御が可能になることで、より複雑で狭い経路の走行が可能となり、モビリティの改善が期待されます。生産性については、通信の遅延が減少することで、AGVの走行速度が向上し、より短期間で物品輸送が可能となることが見込まれます。安全性は、5Gネットワークの信頼性向上により、信号の途切れやAGVの交通遮断の頻度が減少することで改善が期待されます。したが

表5: AGVユースケース評価のために選定された目標・KPI・算定式

技術的目標	主要性能評価指標(KPI)	算定式
モビリティ	・マテリアルハンドリングモビリティ(MHM)	$HM = \frac{\text{システムがサポートする経路数}}{\text{総経路数}}$
	・納期遵守率(OTD)	$OTD = \frac{\text{納期通りの顧客注文数}}{\text{総顧客注文数}}$
	・スペース生産性(SP)	$SP = \frac{\text{生産エリア-修理エリア}}{\text{生産エリア}}$
生産性	・有効性(E)	$E = PRTI * \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の生産時間}}$
	・スループット比率(TR)	$TR = \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の単位実行時間}}$
	・作業者効率(WE)	$WE = \frac{\text{実際の作業時間}}{\text{実際の出勤時間}}$
安全性	・事故率(AR)	$AR = \frac{\text{事故件数}}{\text{実際の出勤時間}}$
	・平均故障間隔(MTBF)	$MTBF = \frac{\text{故障間隔時間}}{\text{故障影響数+1}}$
	・平均復旧時間(MTTR)	$MTTR = \frac{\text{復旧時間}}{\text{総復旧回数}}$

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

合計で9つのKPIを、推定値を用いて計算します。そのためには、表5に示された各数式の分子および分母について、5Gの使用によって影響を受けるかどうかを評価します。これらの仮定は、事実に基づいた推定と経験に基づいた推定の両方にに基づいており、ユースケースに精通した業界の有識者によって提供される必要があります。AGVユースケースにおいては、構内物流の担当者(技術者や管理者)へのヒアリングを通じて、彼らの知見を収集することが推奨されます。

本ホワイトペーパーにおけるAGVユースケースでは、以下のような仮定を例として設定します:

- モビリティ:** AGVの走行速度の向上や、予期せぬ故障による停止時間の削減により、KPI「OTD(納期遵守率)」に対してプラスの影響が期待されます。
- 生産性:** 生産数量の増加により、KPI「E(有効性)」および「TR(スループット比率)」に対してプラスの影響が期待されます。
- 安全性:** 5G通信ネットワークの可用性と信頼性が4Gと比較して高いため、制御信号の途切れが少ないこ

とにより、KPI「AR(事故率)」に対してプラスの影響が期待されます。

この時点で強調しておくべき重要な点は、ここで記載されている仮定は、評価手法の基本的な考え方を示すための例にすぎないということです。これらの仮定はすべてのAGVユースケースに一律に適用できるものではありません。したがって、各ユースケースごとに個別の仮定を設定する必要があります。

次に、5Gの影響に関する数値ベースの仮定を設定します。前述のとおり、これらの仮定は業界の専門知識(ドメイン知識)を持つ有識者の意見に基づくべきです。そのためには、構内物流の専門家が、技術的な利点が選定されたKPIにどのように影響を与えるかを評価する必要があります。正確かつ現実的な仮定を立てるためには、ドメイン知識を持った専門家の知見と、製造現場における5Gの産業応用に関する専門的な知見を組み合わせる必要があります。

対象となるユースケースに対して、以下のような仮定を例として設定します:

- モビリティ:** 5Gの導入による影響は、4Gと比較して全体的な向上をもたらすと予想されます。制御能力の向上により、システムが対応可能な走行経路の数が20%増加すると見込まれます。これは、5Gで制御されるAGVでは、事前に定義された経路に制限されず、より柔軟な走行が可能になるためです。ただし、この増加はあくまで仮定の一例であり、実際の評価には、プロセスの専門家が知識を活用して、5Gの機能が特定のユースケースの主要特性にどのようにプラスの影響を与えるかを推定する必要があります。
- この例では、制御能力の向上によってシステムが対応可能な経路の多様性が増すため、4Gによるソリューションと比較してKPI「**MHM (マテリアルハンドリング指標)**」に20%の向上が期待されます。さらに、AGVの走行速度の向上により、KPI「**OTD (納期遵守率)**」も10%の向上が見込まれます。一方、KPI「**SP (安全性能)**」については、このシナリオでは変化はないと仮定されています。

- 生産性:** 製造施設内の物品の移動がより迅速かつ柔軟になることで、KPI「**E (有効性)**」および「**TR (スループット比率)**」にプラスの影響が期待されます。これにより、生産プロセスに必要な資材や製品の可用性が向上し、KPIに良い影響を与えると考えられます。このシナリオでは、両KPIが5%向上すると仮定されています。なお、KPI「**WE (作業者効率)**」については、5Gの使用による影響はないと仮定されています。
- 安全性:** システムの制御能力の向上により、AGVの制御不具合や故障が減少し、KPI「**MTBF (平均故障間隔)**」にプラスの影響が期待されます。したがって、このユースケースでは、MTBFが5%向上すると仮定されています。一方、KPI「**AR (事故率)**」および「**MTTR (平均修復時間)**」については、5Gの使用による影響はないと仮定されています。

表 6: AGVユースケースにおける4Gに対する5Gの推定影響

目標	主要性能評価指標 (KPI)	4Gに対する5Gの推定影響
モビリティ	・マテリアルハンドリングモビリティ (MHM)	+ 20%
	・納期遵守率 (OTD)	+ 10%
	・スペース生産性 (SP)	影響なし
生産性	・有効性 (E)	+ 5%
	・スループット比率 (TR)	+ 5%
	・作業者効率 (WE)	影響なし
安全性	・事故率 (AR)	影響なし
	・平均故障間隔 (MTBF)	+ 5%
	・平均復旧時間 (MTTR)	影響なし

目標達成率の計算においては、各個別KPIの変化を用いて、5Gの使用による影響から生じる平均的な変化を算出します。モビリティ目標に関しては、以下の式が使用されます：

$$\Delta \text{ モビリティ} = \frac{\Delta \text{ MHM} + \Delta \text{ OTD} + \Delta \text{ SP}}{3}$$

$$\Delta \text{ モビリティ} = \frac{0.2 + 0.1 + 0}{3} = 0.1$$

ステップ4: 目標の評価

ステップ3の計算に基づき、以下の結果が導き出されます。ここでの仮定例に基づくと、モビリティの期待される向上率は 10% です。生産性については 3.33% の向上、安全性については 1.66% の向上が見込まれます。

これらの推定値は、本計算手法が、産業における5Gの利用によるビジネス価値を概算するためにどのように活用できるかを示しています。

必要とする詳細度に応じて、計算の精度を高めるために各KPIに対して追加の数式を定義することが可能です。たとえば、KPI「スループット比率」における係数「生産数量」は、以下の式で表すことができます：

$$\text{生産数量} = \text{生産速度} * \text{生産時間}$$

5Gの影響を、生産率に対する5Gの使用の効果を算出することで、この式に反映することも可能です。これは、追加の推定を行うか、さらなる数式を用いて、どの生産プロセスのパラメータが5Gによって影響を受けるか、そしてその程度を調べることで実現できます。このようにして、ユーザーのニーズに応じて、使用される推定値を実際の生産プロセスに近づけるように、より詳細な数式を用いて手法を洗練させることができます。ただし、このアプローチはモデルの複雑性を高めることになるので注意が必要です。より多くの入れ子構造の数式を解く必要があるためです。

技術的な目標に基づいて、経済的な目標の達成も定量化することができます。たとえば、より効率的な輸送手段により、資材搬送コスト(イントラロジスティクス)が削減される場合、OpEx(運用費用)に好影響を与えます。この例で

は、5Gを活用したAGV(自動搬送車)ユースケースがOpExに好影響を与えるとされています。これは、作業所における資材の未到着による待機時間が短縮されるためです。この短縮は、MHM(マテリアルハンドリングモビリティ)とOTD(納期遵守率)の向上によるものであり、同じ運用費用でより多くの製品を生産できるようになります(表6参照)。

5.2 ミーリング ユースケース

ステップ1: アプリケーション仕様

このユースケースでは、無線通信を活用した閉ループ制御システムが導入され、フィードバックループを構成します。この制御システムは、ブリスル(羽根付き円盤)というターボ機械部品を単一の金属ブロックから加工するミーリング(フライス加工)工程を監視するために使用されます。加工中に発生する超音波信号を検出する音響放射センサーがブリスルに取り付けられ、5G対応のユーザー機器(UE)に接続されます。これにより、遠隔のプロセスコントローラーと加工対象との間に無線接続が確立されます。

測定された音響信号の周波数が許容範囲から逸脱した場合、製品品質の低下の可能性を示すため、遠隔コントローラーがプロセスパラメータを能動的に調整します。この調整により、製品表面のチャターマーク(振動痕)などの品質劣化を防ぐことができます。つまり、5Gを活用した通信により、リアルタイムでプロセスを監視し、望ましい状態からの逸脱が検出された際に介入するインライン品質管理システムが実現されます。この事例では、Ethernetを使用した通信ソリューションとの比較を行います。

ステップ2: 5G-導入目標の設定

このユースケースでは、生産性、品質、持続可能性が技術的目標として選定されており、5Gの活用によってそれぞれの分野で好影響が期待されています。

- 生産性:** 指定された時間内に生産される良品の数が増加することで、改善が期待されます。
- 品質:** インライン品質管理システムによって、チャターマーク(振動痕)のような表面欠陥を回避できるため、品質の最適化が見込まれます。

- ・**持続可能性:**より資源効率の高いプロセスを用いることで実現されます。閉ループ制御システムにより、廃棄物やスクラップの発生が抑えられ、持続可能性の向上に貢献します。

ステップ 3: KPI 推定と計算

生産性、品質、持続可能性という目標の選定に基づき、表7に記載されたKPIとそれぞれの数式が、ミーリング(フライス加工)ユースケースの評価に適用されます。

図1の手法に基づき、合計で11のKPIを推定値に基づいて計算します。表7の数式に含まれる各分子および分母について、5Gの使用がそのパラメータに影響を与えるかどうかドメイン知識を持つ専門家が判断し、影響がある場合はそのおよその大きさを推定する必要があります。

- ・**生産性:**スループットに影響するプロセスパラメータが、監視と制御の強化によって調整可能になるため、KPI「**TR(スループット比)**」には好影響が期待されます。この調整により、表面品質を損なうことなくスループットが向上します。さらに、プロセス監視に費やす時間が減ることで、作業者が他の業務に集中できるようになります。KPI「**WE(作業者効率)**」の向上も見込まれます。
- ・**品質:**品質管理システムの改善により、手直しの必要性やスクラップの発生が大幅に減少するため、KPI「**RR(手直し率)**」および「**SR(廃棄率)**」に対して好影響が期待されます。

表 7: ミーリング(フライス加工)ユースケース評価のために選定された目標・KPI・算定式

技術的目標	主要性能評価指標(KPI)	算定式
生産性	・ 有効性 (E)	$E = PRTI * \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の 生産時間}}$
	・ スループット比率 (TR)	$TR = \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の 単位実行時間}}$
	・ 作業者効率(WE)	$WE = \frac{\text{実際の 作業時間}}{\text{実際の 出勤時間}}$
品質	・ 初回合格率 (FPY)	$FPY = \frac{\text{初回合格品数量}}{\text{検査数量}}$
	・ 品質比率(QR)	$QR = \frac{\text{良品数量}}{\text{生産数量}}$
	・ 手直し率 (RR)	$RR = \frac{\text{再加工数量}}{\text{生産数量}}$
	・ 廃棄率 ((SR))	$SR = \frac{\text{廃棄数量}}{\text{生産数量}}$
持続可能性	・ 圧縮空気消費比率 (ACR)	$ACR = \frac{\text{圧縮空気消費量}}{\text{生産数量}}$
	・ 電力消費比率 (ECR)	$ECR = \frac{\text{電力消費量}}{\text{生産数量}}$
	・ ガス消費比率 (GCR)	$GCR = \frac{\text{ガス消費量}}{\text{生産数量}}$
	・ 水消費比率 (WCR)	$WCR = \frac{\text{水消費量}}{\text{生産数量}}$

- **持続可能性:**資源使用に関連するKPI、特に電力消費に対して好影響が期待されます。プロセスがより効率的になり、資源の有効活用が進むことで、持続可能性が向上します。

AGVユースケースと同様に、このミーリング(フライス加工)ユースケースに関する仮定は、評価手法の基本概念を説明するための例であり、すべての5G技術を用いたミーリング(フライス加工)ユースケースに普遍的に適用できるものではないことには注意が必要です。

次のステップでは、選定された数式の各構成要素に対する5Gの影響について、数値ベースの仮定を設定します。

この手順は、第5.1章で説明された方法と同一です。つまり、ミーリングの専門家が、5Gの技術的利点が選定されたKPIにどのように影響するかを推定します。

正確かつ現実的な仮定を行うためには、業界の専門家のドメイン知識と、製造業における5Gの産業応用に関する専門知識を組み合わせる必要があります。前述のとおり、Ethernetを使用したシナリオがベースラインとなり、5Gを活用したソリューションを比較します。イーサーネットによる実現に対し、5Gによって実現した際の影響の推定結果を表8にまとめました。

表8の項目は、ステップ4において、選定された目標が5Gの活用によってどの程度達成されるかを評価するために使用されます。

表8: ミーリングユースケースにおけるEthernetに対する5Gの推定影響

目標	主要性能評価指標 (KPI)	イーサーネットに対する5Gの推定影響
生産性	• 有効性(E)	影響なし
	• スルートップ比率 (TR)	+ 5 %
	• 作業者効率(WE)	+ 2 %
品質	• 初回合格率 (FPY)	+ 10 %
	• 品質比率 (QR)	+ 5 %
	• 手直し率 (RR)	- 25 %
	• 廃棄率 (SR)	- 80 %
持続可能性	• 圧縮空気消費比率 (ACR)	- 5 %
	• 電力消費比率 (ECR)	- 5 %
	• ガス消費比率 (GCR)	影響なし
	• 水消費比率 (WCR)	- 2 %

ステップ4:目標の評価

AGVユースケースと同様に、ミーリング(フライス加工)ユースケースにおける目標達成率は、各KPIの変化率を算出し、それを各技術目標ごとに平均することで計算されます。以下の数式を用いて、技術的目標を表すことができます。

$$\Delta \text{生産性} = \frac{\Delta E + \Delta TR + \Delta WE}{3}$$

$$\Delta \text{生産性} = \frac{0 + 0.05 + 0.2}{3} = 0.023 = 2.3\%$$

$$\Delta \text{品質} = \frac{\Delta FPY + \Delta QR + \Delta RR + \Delta SR}{4}$$

$$\Delta \text{品質} = \frac{0.1 + 0.05 + 0.25 + 0.8}{4} = 0.3 = 30\%$$

$$\Delta \text{持続可能性} = \frac{\Delta ACR + \Delta ECR + \Delta GCR + \Delta WCR}{4}$$

$$\Delta \text{持続可能性} = \frac{0.05 + 0.05 + 0 + 0.02}{4} = 0.03 = 3\%$$

その結果、生産性は2.3%の向上、品質は30%の向上、持続可能性は3%の向上が期待されると言えます。

5.3 自動車ユースケース

このユースケースに関する記述および計算結果は、機密保持のため匿名化および抽象化されています。

ステップ1: アプリケーション仕様

ビジネス価値の計算手法を検証するために、乗用車製造におけるイントラロジスティクス(構内物流)で、5Gによる無線通信を活用した自動バレーパーキングのユースケースを選定しました。具体的には、ドライバーが運転する通常のバレーパーキングと自動バレーパーキングの比較を行いました。ビジネス価値の計算は、自動車OEMとの緊密な協力のもとで実施されました。

通常のバレーパーキングでは、品質検査後にドライバーが車両を受け取り、指定された駐車スペースまで手動で運転します。高い生産率を維持するためには、十分な数のスタッフを雇用する必要があります。車両を駐車した後、従業員は生産ラインに戻る必要があり、この移動によって待機時間が発生し、工程の効率が低下するとともに、指定された生産率に基づいて人員需要の増加を招きます。

一方、自動バレーパーキングでは、自動運転機能が車両内で処理され、ドライバー無しで車両が自ら駐車スペースへ移動します。各車両には5G対応のユーザー機器(UE)が搭載され、プライベート5Gネットワークに接続されます。これにより、ルートや目的地の駐車場所に関する情報がリアルタイムで通信されます。同時に、車両とインテリジェントインフラとの間で情報が交換され、車載センサーと外部インフラの両方を活用して自動運転機能が支援されます。バックエンドの制御システムは、各車両に対して適切な駐車スペースを選定し、最適なルートを決定します。

続くセクションでは、通常と自動バレーパーキングのKPI(主要性能評価指標)およびROI(投資収益率)の比較が行われます。

ステップ2: 5G-導入目標の選定

このユースケースでは、モビリティが主な技術的目標として選定されており、5Gによる自動バレーパーキングの活用が好影響をもたらすことが期待されています。副次的な目標として、生産性も考慮されています。

- モビリティ:**自動バレーパーキングでは、通常の場合と比べて必要な駐車スペース数が少なくて済むため、**スペース生産性(SP)**や**モビリティ効率(ME)**の向上が期待されます。これにより、ばらつきが減少し、最適なルート計画によって自動化ソリューションの柔軟性も高まります。
- 生産性:**自動バレーパーキングによって人員の必要数が削減されるため、**作業効率(WE)**を通じた生産性の向上が見込まれます。また、業務負荷の分散が可能となり、手動バレーパーキングに伴う待機時間の発生を効果的に排除できます。

ステップ 3: KPI 推定と計算

モビリティと生産性が目標として選定されたことを踏まえ、表9に記載されたKPIとそれぞれの算定式が、自動バレーパーキングと手動バレーパーキングの比較評価に適用されます。

図1の手法に基づき、合計7つの主要性能評価指標(KPI)の推定値をします。表9に記載された各数式の分子および分母について、ドメイン知識を持つ専門家へのインタビューを通じ、各パラメータへの影響とその程度を評価しました。

表 9: 自動バレーパーキングユースケース評価のために選定された目標・KPI・算定式

目標	主要性能評価指標 (KPI)	算定式
モビリティ	・マテリアルハンドリングモビリティ (MHM)	$MHM = \frac{\text{システムがサポートする経路数}}{\text{総経路数}}$
	・納期遵守率(OTD)	$OTD = \frac{\text{納期通りの顧客注文数}}{\text{総顧客注文数}}$
	・スペース生産性 (SP)	$SP = \frac{\text{生産エリア-修理エリア}}{\text{生産エリア}}$
	・モビリティ効率 (ME)	$ME = \frac{\text{システム柔軟性指標}}{\text{最大システム柔軟性指標(10)}}$
生産性	・有効性 (E)	$E = PRTI * \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の生産時間}}$
	・スループット比率 (TR)	$TR = \frac{\text{生産数量}}{\text{実際の単位実行時間}}$
	・作業者効率 (WE)	$WE = \frac{\text{実際の作業時間}}{\text{実際の出勤時間}}$

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

自動バレーパーキングユースケースでは、手動バレーパーキングと比較して、以下に示す仮定が例として設定されています：

- モビリティ:** KPI「SP(スペース生産性)」に好影響が期待されます。自動バレーパーキングシステムの導入により、生産ラインでの駐車スペースが不要となり、利用可能なスペースを他の用途に転用することで効率性が向上します(例:生産率の最適化)。さらに、インタビューから新たに導入されたKPI「ME(モビリティ効率)」は、ソリューションの柔軟性を最適な柔軟性レベルと比較する指標であり、自動バレーパーキングシステムにおいて改善が期待されます。
- 生産性:** KPI「WE(作業者効率)」に好影響が期待されます。自動バレーパーキングでは必要な作業者数が少なくて済み、通常のバレーパーキングに伴う待機時間の削減が可能となります。

次のステップでは、5Gを活用した自動バレーパーキングシステムの影響について、数値ベースの仮定を設定します。この手順は、第5.1章で説明された方法と同様です。つまり、インテラロジスティクス(構内物流)の専門家が、5Gの技術的利点が選定されたKPIにどのように影響するかを推定します。正確かつ現実的な仮定を行うには、業界の専門家のドメイン知識と、製造業における5Gの産業応用に関する専門知識を組み合わせる必要があります。前述のとおり、5Gを活用した自動バレーパーキングによるインテラロジスティクス(構内物流)工程と、通常のバレーパーキングを比較します。影響の推定結果を、表10にまとめました。

表 10: 通常のバレーパーキングに対する自動バレーパーキング(5G活用)の推定影響

目標	主要性能評価指標(KPI)	通常に対する5Gの推定影響
モビリティ	・マテリアルハンドリングモビリティ(MHM)	影響なし
	・納期遵守率(OTD)	影響なし
	・スペース生産性(SP)	+ 90 %
	・モビリティ効率(ME)	+ 50 %
生産性	・有効性(E)	影響なし
	・スループット比率(TR)	影響なし
	・作業者効率(WE)	+ 30 %

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

技術的な目標に加えて、経済的な目標も計算し、5Gを活用した自動バレーパーキングユースケースが通常のバレーパーキングと比較してどれだけの経済的利益をもたらすかを評価しました。ここでは、表3に従ってNPV(正味現在価値)を計算することを選択しました。

計算は以下の数式に基づいて行われます：

$$\Delta NVP = \sum \frac{\text{Cash Flow (AVP - MVP)}_{\text{years}}}{(1 + \text{Discount Rate})^{\text{years}}} = \text{Invest}$$

この計算では、自動バレーパーキング(AVP)と通常のバレーパーキング(MVP)のNPV(正味現在価値)の差を10年間にわたって比較しました。キャッシュフローの計算においては、従業員の給与、保守費用、電力などの継続的なコストが考慮されています。投資額の計算では、5Gシステムおよびスマートインフラに関連する一時的な費用が見積もりに含まれています。経済面の分析結果を表11に示します。

最後に、NPVの計算と併せて損益分岐点の推定も行われました。損益分岐点の計算に対応するグラフを図2に示します。

表 11: 経済的目標と結果

経済的目標	結果
△ NVP (期間 = 10 年)	+ 48.691,58 €
償却期間	7年後
製品あたりのOPEX差 $\Delta \frac{\text{OPEX}}{\text{Product}}$	$\frac{\text{OPEX}_{\text{AVP}} - \text{OPEX}_{\text{MVP}}}{\text{Product}} = -255,00 \text{ €}$

出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

このホワイトペーパーにおいて、自動バレーパーキングユースケースに関する仮定は業界の有識者との協力のもとで作成されたものの、知的財産を保護するために一部のパラメータが調整されていることに留意ください。これらの仮定は、5Gを活用したすべての自動バレーパーキングユースケースに適用できるものではなく、提供された特定の情報に基づいて開発されたものです。

表10および表11の項目は、ステップ4において、選定された目標が5Gの活用によってどの程度達成されるかを評価するために使用されます。

ステップ4: 目標の評価

AGVおよびミーリング(フライス加工)ユースケースと同様に、自動バレーパーキングユースケースにおける目標達成率は、各KPIの変化率を算出し、それを各技術的目標ごとに平均することで計算されます。

$$\Delta \text{ モビリティ} = \frac{\Delta \text{ MHM} + \Delta \text{ OTD} + \Delta \text{ SP} + \Delta \text{ ME}}{4}$$

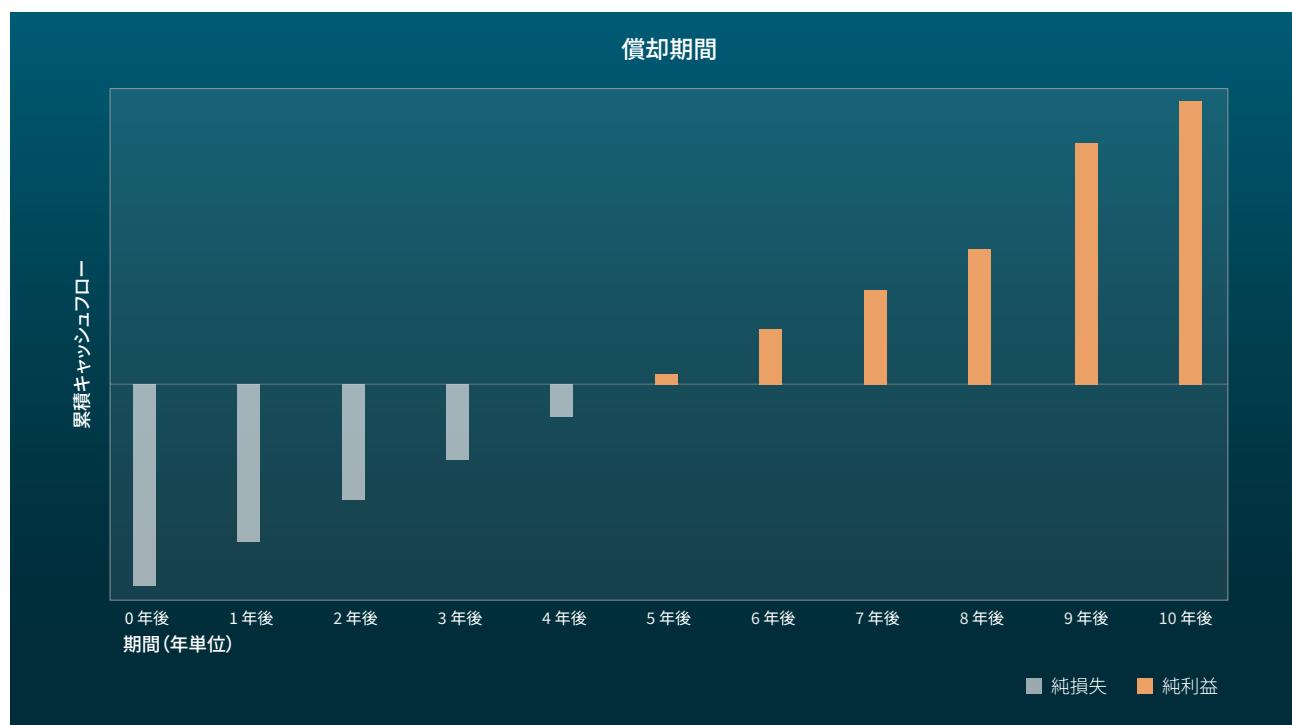
$$\Delta \text{ モビリティ} = \frac{0 + 0 + 0.9 + 0.5}{4} = 0.35 = 35\%$$

$$\Delta \text{ 生産性} = \frac{\Delta \text{ E} + \Delta \text{ TR} + \Delta \text{ WE}}{3}$$

$$\Delta \text{ 生産性} = \frac{0 + 0 + 0.3}{3} = 0.1 = 10\%$$

その結果、モビリティは35%の向上、生産性は10%の向上が期待されると結論づけることができます。検討されたデータセットに基づくと、5Gを活用した自動バレーパーキングユースケースへの投資は7年後に収益化されると見込まれます。なお、より高い生産率などの他の要因の影響はこの計算には含まれていません。これらの要因を加味すれば、より早い償却につながる可能性があります。

図2 自動バレーパーキングと通常のバレーパーキングの償却期間



出展 5G-ACIA / ZVEI e.V.

5.4 現時点での結論

選定された3つのユースケース例は、開発された評価手法が比較的少ない労力で幅広い産業用5Gユースケースに適用可能であることを示しています。

まず、シンプルなスプレッドシートを使用してKPIの算定式を定義し、5Gが重要なプロセスパラメータに与える影響の推定値に基づいて計算を行うことができます。これらのスプレッドシートの内容は、より包括的なアプローチを実装するためにソフトウェアソリューション(例:Webツール)に移行することが可能です。

各ユースケースの「目標評価」セクションに示されているように、「モビリティ」「生産性」「持続可能性」などの目標に対する改善率(%)が計算されました。

NPVやROIなどの経済的目標の計算に加えて、企業は例え「生産性が10%向上した場合の金銭的価値」を算出することで、達成可能な改善に対する金銭的価値を割り当てることも可能です。これにより、その向上が企業のEBITDA(利息・税金・償却前利益)に与える好影響を推定することができます。この計算は企業ごとに非常に特化した内容となるため、このホワイトペーパーのユースケース例では実施されません。

6 まとめと展望

このホワイトペーパーの主な目的は、産業用5Gユースケースのビジネス価値を推定ベースで評価するための方法論を提示することです。ビジネス価値の評価は非常に重要な課題であり、産業界では5Gアプリケーションのビジネス価値に関する透明性が不足しているため、5Gインフラの拡張への投資に慎重な姿勢が続いている。これまでの研究では、ビジネス価値や投資収益率(ROI)の計算に焦点が当てられてきましたが、5Gを活用したユースケースの価値提案を体系的に捉えるための汎用的な手法はまだ存在していませんでした。本ホワイトペーパーで提示された方法論は、まさにこのギャップを埋めることを目的としています。

そのために、方法論の基本原則を詳細に説明し、3つの異なる産業用5Gユースケースへの適用を通じて具体的に示しました。記載された原則を活用し、これらのユースケースに適用することで、関心のある企業は、技術・経済的目標、関連するKPI、基礎となる数式、そして5G技術がそれらの構成要素に与える影響の推定値を定義することで、自社のユースケース評価を開始することができます。

このようにして、本ホワイトペーパーは、5G技術のより広範な導入を促進し、産業界におけるデジタルトランスフォーメーションの加速を支援することを目指しています。方法論の適用を示すために、3つのユースケース例が提示されており、重要なパラメータに対する5Gの影響について仮定が

設定されています。最初の2つのユースケースは、従来型の製造業を背景としています。一つ目は、インテラロジстиクス(構内物流)における5Gの応用可能性を示すAGVユースケースであり、二つ目は、ターボ機械部品の製造におけるミーリング(フライス加工)ユースケースを通じて、5G技術を製造プロセスに直接統合することに焦点を当てています。これら2つのユースケースは、技術的な成熟度の面ではまだ初期検証段階にあり、実際の製造環境ではまだ導入されません。

三つ目のユースケースである自動バレーパーキングは、すでに自動車製造施設の実運用環境で導入されています。このユースケースの分析は、5Gがすでに今日の時点で、重要な生産システムのパラメータに対して大きな好影響を与える可能性があることを示しています。

本方法論の適用や、産業用5Gユースケースのビジネス価値を算出するための個別分析に関心のある組織や団体は、5G-ACIA事務局までお問い合わせください。

7 略語一覧

5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation	mMTC	Massive Machine Type Communication
AGV	Automated guided vehicle	MTBF	Mean Time Between Failures
A	Availability	MTTR	Mean Time to Repair
ACR	Compressed Air Consumption Ratio	NPV	Net Present Value
AE	Allocation Efficiency	On-Time Delivery	OTD
AR	Accident Ratio	OpEx	Operational Expenditure
BLISK	Bladed Disk	QR	Quality Ratio
CapEx	Capital Expenditure	RoI	Return on Invest
E	Effectiveness	RR	Rework Ratio
ECR	Electric Power Consumption	SP	Space Productivity
FPY	First Pass Yield	SR	Scrap Ratio
GCR	Gas Consumption Ratio	SUR	Setup Ratio
IT/OT	Information Technology/ Operation Technology	TE	Technical Efficiency
KPI	Key Performance Indicator	TR	Throughput Ratio
MF	Machine Flexibility	UE	Utilization Efficiency
MHM	Material Handling Mobility	WCR	Water Consumption Ratio
		WE	Worker Efficiency

8 参考文献

- [1] Nick Kriegeskotte. (2022). 5G ist für 85 Prozent der Industrieunternehmen relevant. Bitkom e.V. Online available: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/5G-relevant-Industrieunternehmen>
- [2] Kiesel, R [R.], Boehm, F., Pennekamp, J., & Schmitt, R. H [R. H.] (2021). Development of a Model to Evaluate the Potential of 5G Technology for Latency-critical Applications in Production. In 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 739–744). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9673074>
- [3] Kiesel, R [Raphael], Henke, L., Mann, A., Renneberg, F., Stich, V., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2022). Techno-Economic Evaluation of 5G Technology for Automated Guided Vehicles in Production. Electronics, 11(2), 192. <https://doi.org/10.3390/electronics11020192>
- [4] Kiesel, R [Raphael], Schmitt, S., König, N., Brochhaus, M., Vollmer, T., Stichling, K., Mann, A., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2022). Techno-Economic Evaluation of 5G-NSA-NPN for Networked Control Systems. Electronics, 11(11), 1736. <https://doi.org/10.3390/electronics1111736>
- [5] Kiesel, R [Raphael], Stichling, K., Hemmers, P., Vollmer, T., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2021). Quantification of Influence of 5G Technology Implementation on Process Performance in Production. Procedia CIRP, 104, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.018>
- [6] ISO, 2014. 22400-1: Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management. 01.10.2014

5G-ACIA White Paper

Business Value and Return-on-Invest Calculation
for Industrial 5G Use Cases

Contact

5G-ACIA
Amelia-Mary-Earhart-Str. 12
60549 Frankfurt am Main
Germany
Phone: +49 69 6302-209
Email: info@5g-acia.org
www.5g-acia.org

Published by

ZVEI – German Electro and Digital Industry Association,
5G-ACIA – 5G Alliance for Connected Industries and
Automation, a Working Party of ZVEI
www.zvei.org

Published in June 2025

© ZVEI e. V.

This work, including all of its parts, is protected by copyright.
Any use outside the strict limits of copyright law without
the consent of the publisher is prohibited. This applies in
particular to reproduction, translation, microfilming, storage,
and processing in electronic systems. Although ZVEI has
taken the greatest possible care in preparing this document,
it accepts no liability for the content.

Design: COBRAND

9 5G-ACIA会員企業

2025年6月時点





KEYSIGHT

kontron

MITSUBISHI ELECTRIC

MOXA

MUGLER
TELCO NETWORKS.

NOKIA

NXP

OMRON

orange™

PEPPERL+FUCHS

PHOENIX CONTACT

Qualcomm

RELIABLE
REAL-TIME
RADIO

Radisys

Rockwell Automation

ROHDE & SCHWARZ



SILICON AUSTRIA LABS

salzburgresearch

Schneider
Electric

SIEMENS

SINTEF

SoftBank

SONY

SPIE

ST life.augmented

T

telent

TNO

TRUMPF

III
電信技術中心
TELECOM TECHNOLOGY CENTER

u-blox

UNIBERG

University of
Sheffield / AMRC
North West

UPLINK

verizon

VOLKSWAGEN
AKTIENGESELLSCHAFT

WAGO

Weidmüller

WYRED

YOKOGAWA

5G-ACIA.org